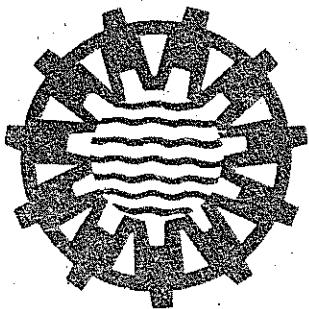


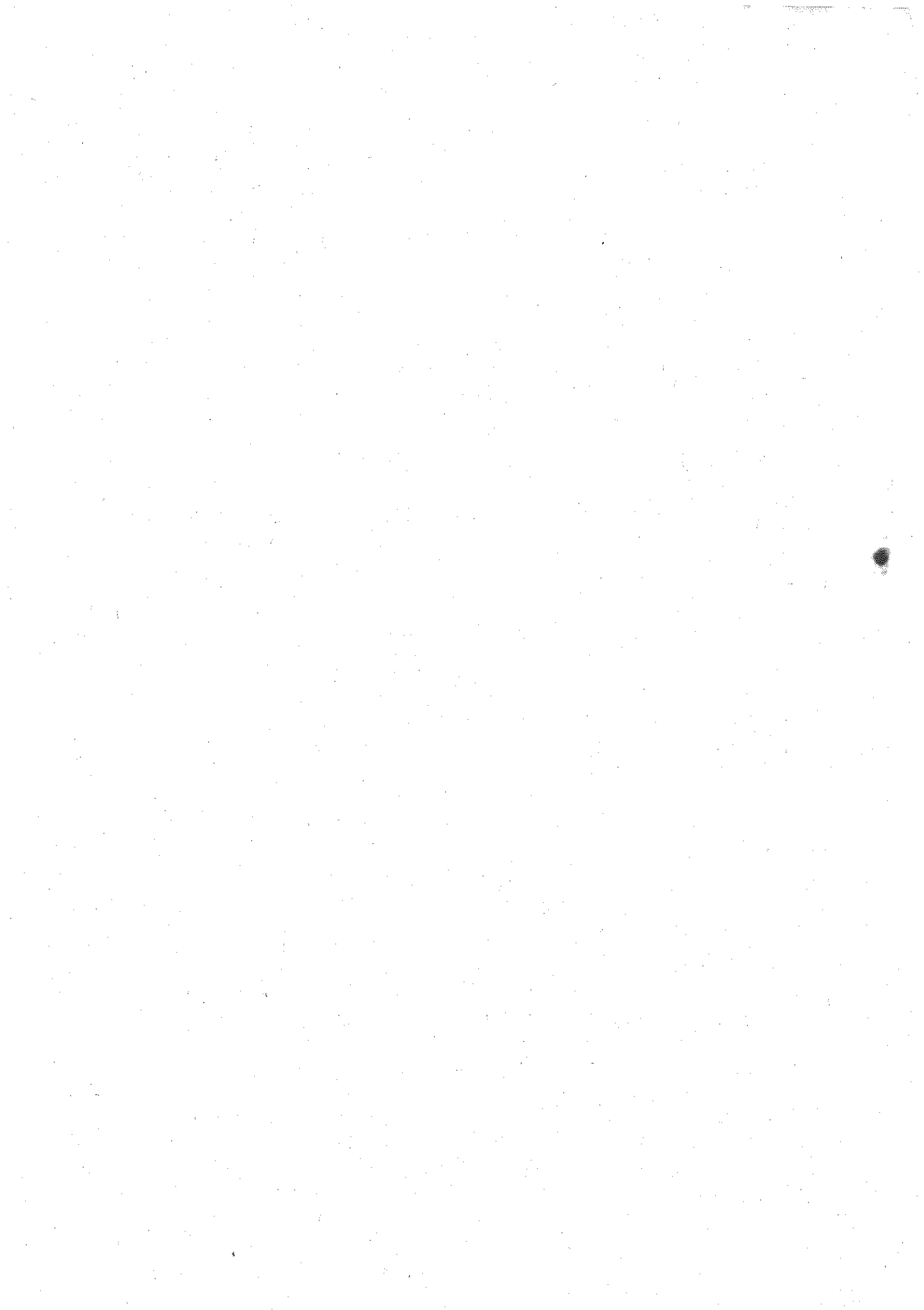
**Länderarbeitsgemeinschaft Wasser
(LAWA)**

**Grundlagen
für die Beurteilung
der Wärmebelastungen
von Gewässern**

2. verbesserte Auflage 1977



**Teil 1: Binnengewässer
ausgearbeitet von der LAWA-Arbeitsgruppe
- Wärmebelastung der Gewässer -**



Herausgegeben von der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) 1977
Druck und Vertrieb: Dr. Hanns Krach, Universitätsdruckerei und Verlag, Inh. Hermann Schmidt,
Postfach 2730 · Robert-Koch-Straße 8 · 6500 Mainz · Telefon (06131) 50678

Inhalt

Geleitwort des LAWA-Vorsitzenden	9
Vorwort zur 2. Auflage	10
Vorwort zur 1. Auflage	13
I. Kapitel	
Einleitung	14
II. Kapitel	
Kriterien bei der Beurteilung von Wärmeeinleitungen in Gewässer	17
1. Gewässertemperaturen	17
1.1 Natürliche Gewässertemperaturen, Maximalwerte, Dauerzahlen	17
1.2 Aus thermischen Kraftwerken abzuführende Wärmemengen	23
1.3 Die Temperaturverteilung nach Warmwassereinleitungen (Mischungsvorgang) ..	28
1.3.1 Temperaturverteilung in Fließgewässern	28
1.3.2 Temperaturverteilung in Seen	29
1.3.3 Temperaturverteilung im Grundwasser	29
1.4 Abkühlung	29
1.5 Wassertemperatur an der nächsten Kühlwasserentnahmestelle	31
2. Sauerstoffhaushalt	32
2.1 Ursprüngliche Sauerstoffverhältnisse	32
2.2 Veränderungen des Sauerstoffgehaltes im Kraftwerk als Folge der Behandlung des Kühlwassers im Werk	35
2.3 Veränderung der Sauerstoffverhältnisse durch die Aufwärmung	35
2.3.1 Sauerstofflängsprofil in Fließgewässern	35
2.3.2 Seen	37
2.4 Verbesserung des Sauerstoffhaushaltes im Vorfluter	37
2.4.1 Allgemeines	37
2.4.2 Maßnahmen zur Verbesserung des Sauerstoffhaushaltes	38
3. Biologischer Zustand	39
3.1 Allgemeines	39
3.2 Fische	40
3.3 Sonstige Makroorganismen	42
3.4 Mikroorganismen	42
4. Chemischer Zustand	44
4.1 Sauerstoffhaushalt	44
4.2 Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht	44
4.2.1 Löslichkeit des Kohlendioxids im Wasser	44
4.2.2 Biogene Verschiebung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts	44
4.3 Stickstoffhaushalt	45
4.3.1 Ammonium-Ammoniak-Gleichgewicht	45
4.3.2 Konzentration an Ammonium-Stickstoff	45
4.3.3 Konzentration an Nitrit- und Nitratstickstoff	45
4.4 Organische Stoffe	45

4.5	Geruchs- und Geschmacksstoffe	45
4.6	Erhöhte Konzentration an organischen und anorganischen Inhaltsstoffen	46
4.7	Beschleunigung der Lösevorgänge	46
4.8	Korrosion	46
5.	Nebelbildung	47
6.	Wasserverluste	47
7.	Auswirkungen auf Wasserbenutzer	48
7.1	Trink- und Betriebswassergewinnung	48
7.2	Fischerei	49
7.3	Erholung und Fremdenverkehr	51
7.4	Schifffahrt	51
III. Kapitel		
Kriterien bei der Beurteilung von Wärmeeinleitungen in Gewässer bei Anwendung von Kühlmaßnahmen		52
1.	Typen der Kühltürme und ihre Technik	52
1.1	Bauliches	52
1.2	Erfordernis an Zusatzwasser	54
2.	Abhängigkeit des Kühlturbetriebes von den meteorologischen Gegebenheiten	55
2.1	Die wichtigsten Parameter	55
2.2	Verdeutlichung am praktischen Beispiel	56
2.3	Häufigkeit meteorologischer Werte	56
2.4	Schlußfolgerung	57
3.	Wasseraufbereitung für den Kühlturbetrieb	65
3.1	Reinigung des Zusatzwassers	65
3.2	Chemische Wasseraufbereitung	66
3.2.1	Säure-Entkarbonisierung	67
3.2.2	Kalk-Entkarbonisierung in einem X-ator	67
3.3	Möglichkeiten der technischen Durchführung der Zusatzwasseraufbereitung	67
4.	Biozönotische Gegebenheiten in Kühlkreislaufsystemen und die sich einstellenden Einleitungs- und Kondensatortemperaturen	69
5.	Einsatz von Bioziden im Kühlkreislauf	74
IV. Kapitel		
Grundlagen für die Berechnung der Temperatur eines Gewässers		77
1.	Die Theorie des Wärmehaushaltes von Gewässern	77
1.1	Die Wärmeleistungsbilanz eines Flußabschnittes	77
1.2	Die einzelnen Komponenten der Wärmebilanz (Wärmequellen und Wärmesenken)	79
1.2.1	Übersicht	79
1.2.2	Direkt eingetragene Wärme	80
1.2.3	Die Strahlungsbilanz	81
1.2.3.1	Übersicht	81

1.2.3.2	Die Globalstrahlung (direkte Sonnenstrahlung und diffuse Himmelsstrahlung)	83
1.2.3.3	Die Wärmestrahlungsbilanz	85
1.2.3.4	Die Gesamtstrahlungsbilanz	88
1.2.4	Verdunstung und Konvektion	90
1.2.4.1	Ermittlung des Wärmeaustausches infolge Verdunstung und Konvektion mit Hilfe der Stoffübergangszahl und der Wärmeübergangszahl	90
1.2.4.2	Einige einfache Beziehungen für die Ermittlung der Verdunstung	93
2.	Möglichkeiten zur Berechnung der Temperatur eines Gewässers	97
2.1	Berechnung mit Hilfe einer Exponentialfunktion	97
2.1.1	Begründung und Ableitung der Exponentialfunktion	97
2.1.2	Bestimmung des Wärmeaustauschkoeffizienten K	99
2.1.2.1	Abschätzung aus der Wärmebilanz eines Tages	99
2.1.2.2	Ableitung aus bekannten Temperaturverläufen	100
2.1.2.3	Abschätzung aus dem Vergleich von täglichen Mittelwerten der Luft- und Wassertemperatur	100
2.1.3	Beurteilung der Exponentialmethode	101
2.2	Computer-Simulation der Energieaustauschvorgänge	101

V. Kapitel

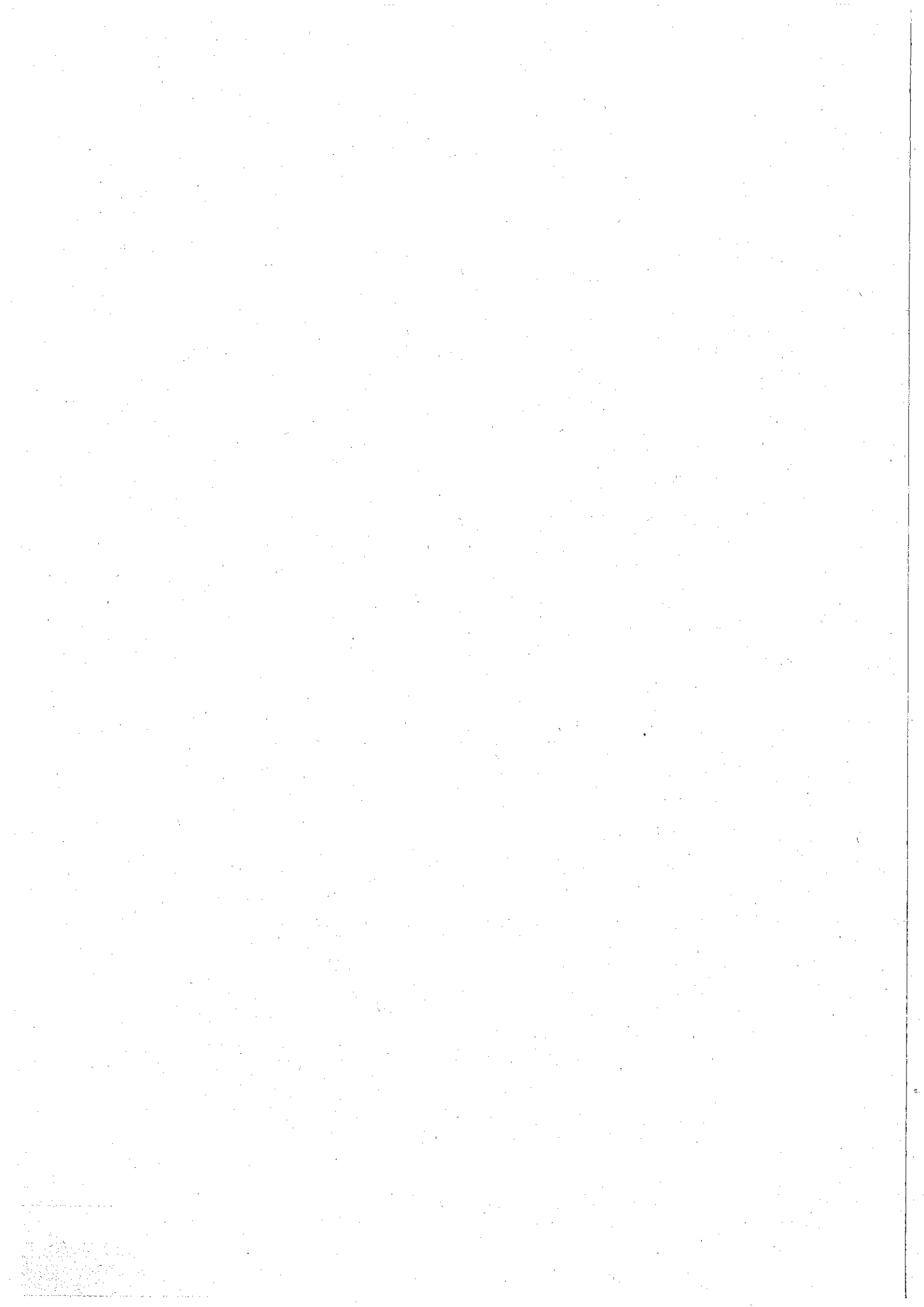
Berechnungsunterlagen und Rechenverfahren zur Ermittlung der Temperatur eines Gewässers	102
1. Bezugsdaten	102
1.1 Bezugsabfluß und natürliche Gewässertemperatur	102
1.2 Meteorologische Werte	106
2. Die numerische Ermittlung der Temperatur eines Gewässers durch Simulation der Wärmeaustauschvorgänge	111

VI. Kapitel

Hinweise für wasserrechtliche Verfahren	116
--	-----

Anlagen:

1. Verzeichnis der erstellten und in Bearbeitung befindlichen Wärmelastpläne	119
2. Literaturhinweise	121



Die in der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) zusammenarbeitenden obersten Wasserbehörden der Länder bildeten aus Anlaß der vielfältigen Planungen zur Sicherstellung der Energieversorgung der Bundesrepublik Deutschland im Jahre 1969 eine Arbeitsgruppe „Wärmebelastung der Gewässer“, in die namhafte Sachverständige aus Wissenschaft, Technik und Verwaltung berufen wurden. Aufgabe war, die Folgen von Wärmeeinleitungen in Gewässer zu untersuchen und Voraussetzungen, Bedingungen und Grenzen einer schadlosen Beseitigung der nicht mehr nutzbaren Energien in Gewässern aufzuzeigen und dazu grundlegende Empfehlungen abzugeben.

Diese Arbeitsgruppe erarbeitete seinerzeit mit der 1. Auflage der Grundlagen das „Gelbe Buch“, das im In- und Ausland wegen der zusammenfassenden Darstellung bisheriger Erkenntnisse Bedeutung gewonnen hat. Die Nachfrage nach diesem inzwischen vergriffenen Werk veranlaßte die LAWA, die Arbeitsgruppe mit den Vorbereitungen zu einer Neuauflage unter Einarbeitung der bislang gesammelten Erfahrungen zu beauftragen. Auch mit der vorliegenden 2. Auflage der „Grundlagen für die Beurteilung der Wärmebelastungen von Gewässern“ kann der Themenkreis jedoch sicherlich noch nicht als abgeschlossen angesehen werden, so daß die LAWA bemüht bleiben wird, den Kenntnisstand auf dem Gebiet der Wärmebelastung der Gewässer weiter zu vertiefen.

Als Ergänzung bereitet eine Untergruppe der LAWA-Arbeitsgruppe gegenwärtig eine Ausarbeitung über Kühlwassereinleitungen im Tidebereich vor, in der auf die besonderen hydrologischen, hydraulischen, physikalischen und biologischen Bedingungen in diesen Gewässern eingegangen wird.

Der besondere Dank der LAWA gilt neben den Mitgliedern der Arbeitsgruppe auch der Wasserwirtschaftsverwaltung des Landes Rheinland-Pfalz für ihre wertvolle Hilfe bei der Gestaltung und Veröffentlichung der Neuauflage.

Hannover, im Dezember 1977



Niedersächsischer Minister für
Ernährung, Landwirtschaft und
Forsten
Vorsitzender der
Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA)

Vorwort zur 2. Auflage

Die LAWA-Arbeitsgruppe „Wärmebelastung der Gewässer“ legt hiermit den 1. Teil der 2. Auflage der „Grundlagen zur Beurteilung der Wärmebelastungen von Gewässern“ vor. Eine Zweiteilung dieser Grundlagen in „Binnengewässer“ und „Tidegewässer“ erschien sinnvoll, um die unterschiedlichen Beurteilungskriterien deutlicher herauszustellen. Der 2. Teil „Tidegewässer“ befindet sich in Bearbeitung, so daß alsbald mit der Veröffentlichung gerechnet werden kann.

Eine Neubearbeitung der „Grundlagen zur Beurteilung der Wärmebelastungen von Gewässern“ bzw. des „Gelben Buches“ (ein Ausdruck, der sich allmählich eingebürgert hat) erschien dringend geboten. Die Bearbeitung der 1. Auflage war vornehmlich initiiert durch die Kraftwerksplanungen am Rhein. Der seinerzeitige Kenntnisstand über die Auswirkungen von Wärmeeinleitungen in Gewässer war gering, und es bedurfte zäher Arbeit, einen Teil der sehr weit gestreuten Literatur zu sammeln und auszuwerten. Insbesondere war es erforderlich, Material über möglichst viele umweltrelevante Faktoren zusammenzustellen, um eine Gesamtbewertung, an der es bislang mangelte, zu ermöglichen. Es war deshalb unvermeidbar, aus Einzelbeobachtungen Analogieschlüsse zu ziehen und diese in ein Gesamtkonzept einzuordnen. Aus der deduktiven Betrachtungsweise ergab sich zwangsläufig mangels ausreichender Erfahrungstatsachen ein prophylaktisches Denken, das sich in der 1. Auflage der „Grundlagen“ in den vielen Konjunktivformulierungen niedergeschlagen hat. Dieser vorsichtigen Formulierungsweise haftete jedoch der Nachteil an, daß aufgezeigte Möglichkeiten der Beeinflussungen von Gewässern durch Wärmeeinleitungen mancherorts als tatsächlich sich einstellende Folgen angenommen wurden.

Zwischen der 1. Auflage der „Grundlagen“ und der hiermit vorgelegten Neufassung liegt eine Zeitspanne von über sechs Jahren, während der eine Reihe von Erfahrungen aus dem realen Kraftwerksbetrieb gesammelt werden konnte. Daneben führte eine Vielzahl von Forschungsarbeiten zu wesentlich neuen Erkenntnissen, die, mit der Praxis koordiniert, eine systemgerechte Betrachtungsweise nunmehr ermöglichen. Das seinerzeitige vorsichtige Abtasten von möglichen Gefahrenquellen bei Wärmeeinleitungen wird jetzt teilweise durch Folgerungen aus dem Kraftwerksbetrieb auf die erwiesenen Geschehnisse im Gewässer abgelöst. Hierbei wird keinesfalls behauptet, daß damit gleichsam eine Ermittlungs- und Folgerungsphase abgeschlossen ist, vielmehr muß durch weitere Untersuchungen der jetzige Erkenntnisstand vertieft und erweitert werden.

Es ist außerdem ein besonderes Anliegen der LAWA-Arbeitsgruppe, in der Neufassung den Kenntnisstand über den Einsatz von Naßkühltürmen darzulegen, weil hierzu divergierende Meinungen vorgetragen wurden. Wohl un widersprochen bleibt die Tatsache, daß mittels Naßkühltürmen die Wärmebelastung von Gewässern evident erniedrigt werden kann. Widersprüchlich blieben jedoch die Vorstellungen über die Geschehnisse im Kondensator und im Kühlturm selbst, die mit Sterbe- und Absterbequoten kommentiert wurden und insofern eine Klärung der Geschehnisse zwingend erforderlich war. Dem wurde in der vorliegenden 2. Auflage entsprochen.

Der seinerzeitigen Fassung der 1. Auflage des „Gelben Buches“ wurde als Folgerung zu den aufgezeigten Grundlagen für die Berechnung der Temperatur eines Gewässers als Beispiel der „Wärmelastplan Rhein“ angefügt. Eine solche Ergänzung ist nunmehr nicht mehr erforderlich, weil zwischenzeitlich weitere Wärmelastrechnungen aufgestellt wurden (die jeweils angeführt werden) und sich gegenwärtig noch eine nicht mindere Zahl in Bearbeitung befindet. Im übrigen setzte der seinerzeitige Wärmelastplan Rhein zwar wesentliche Akzente in der Bewertung der Wärmebelastung von Gewässern. Inzwischen hat sich die Erkenntnis durchgesetzt und auch in wasserrechtlichen Bescheiden für Kraftwerke niedergeschlagen, daß die Temperatur nur einer der Parameter ist und daß die Kühlwassereinleitungen auch vom momentanen Gütezustand des Gewässers abhängig gemacht werden müssen. Eine solche Klarstellung erschien erforderlich, um möglichen weiteren Fehldeutungen vorzubeugen.

Entsprechend der Ankündigung in der 1. Auflage sind die verwendeten Einheiten inzwischen den neuen gesetzlichen Regelungen angepaßt worden.

Die LAWA-Arbeitsgruppe meint, daß sie mit dieser Gemeinschaftsarbeit einen weiteren Beitrag zum Umweltschutz, hier zur Gesunderhaltung des lebensnotwendigen Grundstoffes Wasser, geleistet hat, und sie hofft, daß die mitgeteilten Kenntnisse und Erkenntnisse in allen Bereichen der Öffentlichkeit, in Wissenschaft, Technik und Verwaltung bei allfällig anstehenden Problemfällen Berücksichtigung finden.

Mainz, im Dezember 1977

Mitglieder der Arbeitsgruppe

Min.Rat Prof. Dr. Klotter (Obmann)	Ministerium für Landwirtschaft, Weinbau und Umweltschutz, Rheinland-Pfalz, Mainz
Prof. Dr.-Ing. Böhnke	Techn. Hochschule Aachen Institut f. Siedlungswasserwirtschaft (Vertreter der ATV)
Ltd. Reg.Baudir. Dr.-Ing. Eckoldt (bis 1975)	Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
Oberreg.Baurat Fleig	Landesanstalt für Umweltschutz, Baden-Württemberg, Karlsruhe
Reg.Baudir. Dr.-Ing. Flinspach (bis 1975)	Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Umwelt, Baden-Württemberg, Stuttgart
Direktor Dr.-Ing. Frost (bis 1975)	BASF AG, Ludwigshafen (Vertreter des BDI/VCI)
Oberreg.Rat Günneberg	Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
Dipl.-Chem. Dr. Haberer	ESWE – Stadtwerke Wiesbaden AG, Wiesbaden (Vertreter des DVGW)

Dipl.-Chem. Dr. Heymann	Niederrheinische Gas- und Wasserwerke GmbH, Duisburg (Vertreter des DVGW)
Reg.Dir. Johannsen	Deutscher Wetterdienst, Offenbach
Reg.Dir. Dr. Kothé	Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
Direktor Dr.-Ing. Krolewski	Vereinigte Elektrizitätswerke Westfalen AG, Dortmund (Vertreter der VDEW)
Chem.Dir. Dr. von Loh	Niedersächsisches Wasseruntersuchungsamt, Hildesheim
Dipl.-Phys. Lubda	Behörde für Wirtschaft, Verkehr und Landwirtschaft – Strom- und Hafenbau – Hamburg
Reg.Direktorin Dr. Pätze	Landesanstalt für Wasser und Abfall, Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf
Direktor Dr. Peine (ab 1976)	BASF AG, Ludwigshafen (Vertreter des BDI/VCI)
Abt.-Direktor Dr.-Ing. Richter	Bayernwerk AG, München (Vertreter der VDEW)
Oberreg.Rat Dr.-Ing. Steinlein	Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, München
Direktor Dr. Trobisch (bis 1975)	Farbwerke Hoechst AG, Frankfurt-Höchst (Vertreter des BDI/VCI)
Oberreg.Baurat Wörner (ab 1976)	Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Umwelt Baden-Württemberg, Stuttgart
Weiterhin haben an der Neufassung der „Grundlagen“ mitgewirkt:	
Dipl.Ing. Habbe	Landesanstalt für Umweltschutz, Baden-Württemberg, Karlsruhe
Bauamtsrat Loos (Geschäftsführer)	Ministerium für Landwirtschaft, Weinbau und Umweltschutz Rheinland-Pfalz, Mainz
Dr. rer. nat. Resch	Vereinigte Elektrizitätswerke Westfalen AG (Vertreter des VGB-Hauptausschusses „Chemie im Kraftwerk“)
Dipl.-Ing. Ritter	Techn. Hochschule Aachen Institut für Siedlungswasserwirtschaft
Dr.-Ing. Täubert	Vereinigte Elektrizitätswerke Westfalen AG, Dortmund
Dr. rer. nat. Wunderlich	Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

Vorwort zur 1. Auflage

Nach dem Bekanntwerden der verschiedensten Kraftwerksplanungen am Hoch- und Oberrhein befaßte sich die Arbeitsgemeinschaft der Länder zur Reinhaltung des Rheins sofort mit den sich daraus möglicherweise ergebenden Folgen hinsichtlich des Wärmehaushalts dieses Stromes. Auch aus anderen Gebieten wurden Planungen bekannt, weshalb die Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) – Zusammenschluß der Obersten Wasserbehörden der Länder – gebeten wurde, eine einheitliche Lösung des anstehenden Problemkreises für alle Bundesländer anzustreben. In der 46. Sitzung der LAWA am 4./5. März 1969 wurde beschlossen, eine Arbeitsgruppe aus Sachverständigen der Länder, des Bundes und der interessierten Verbände zu bilden mit dem Auftrag, Grundlagen für die Beurteilung von Wärmeeinleitungen zu erarbeiten.

Die Arbeitsgruppe hat in neun Sitzungen unter Berücksichtigung des gegenwärtigen Standes der wissenschaftlichen Kenntnisse und Erkenntnisse die hiermit vorgelegten Grundlagen fertiggestellt. Leider konnten nicht alle Kapitel vollständig abgeschlossen werden, da entsprechendes Zahlenmaterial in einzelnen Fällen noch fehlt. Aus diesem Grunde erfolgt die Veröffentlichung als Ringbuch, um spätere Ergänzungen einfügen zu können.

Die in der Ausarbeitung benutzten Einheiten entsprechen dem derzeitigen Stand der Verwendung in Wissenschaft und Technik. Da die neuen Einheiten gemäß dem Gesetz über Einheiten im Meßwesen vom 2. 7. 1969 (BGB1. I S. 709) und der Ausführungsverordnung zum Gesetz über Einheiten im Meßwesen vom 26. 6. 1970 (BGB1. I S. 981) noch nicht genügend verbreitet sind, ist die Anpassung an diese Vorschriften in einer späteren Neuauflage vorgesehen. Die Arbeitsgruppe hofft, mit den vorgelegten Grundlagen einen Beitrag zum Schutz der Gewässer geleistet zu haben.

Mainz, den 21. Okt. 1971

I. Kapitel

Einleitung

Bei der Erzeugung elektrischer Energie wie auch bei der Produktion der verschiedensten Bedarfsgüter entsteht Wärme, die in irgendeiner Weise abgeführt werden muß. Bis noch vor wenigen Jahren war Wasser das Kühlmittel schlechthin. Mit der Zunahme der Industrialisierung, der Steigerung des Lebensstandards der Bevölkerung und der damit verbundenen Erhöhung des Bedarfes an elektrischer Energie stehen aber nicht mehr die erforderlichen Wassermengen zu Kühlzwecken zur Verfügung, will man nicht die Gewässer in unzuträglicher Weise mit Wärme belasten. Das führte zur Entwicklung der verschiedensten Kühlsysteme, wie z. B. Rückkühlung über Kühltürme oder Trockenkühlung, die die Durchlaufkühlung ersetzen oder in Kombination mit der Durchlaufkühlung verwendet werden können. Trotzdem werden die Gewässer auch künftig einen Teil der Abwärme noch aufnehmen müssen.

Die zuständigen Wasserbehörden haben die Aufgabe, die Wärmebelastung der Gewässer so zu begrenzen, daß die Gewässer ihre vielfältigen Funktionen auch weiterhin erfüllen können. Dazu ist es erforderlich, sich mit den recht komplexen Problemen der Gewässererwärmung zu befassen und jeden Einzelfall aus der Gesamtschau aller für diesen Fall bedeutsamen jetzigen und künftigen Belastungen sorgfältig zu prüfen. Es ist grundsätzlich nicht möglich, für alle Gewässer den gleichen Grenzwert für die zulässige Aufwärmung des Wassers festzusetzen.

Wie auf allen Gebieten von Wissenschaft und Technik muß auch hier oft noch von Annahmen ausgegangen werden.

Es bedarf deshalb weiterer Meßreihen und wissenschaftlicher Forschungen, um die Probleme zu lösen. Insofern mußten in die hier vorgelegten „Grundlagen“ der gegenwärtige Stand der Kenntnisse gleichsam in Lehrbuchform eingearbeitet werden, um überhaupt den gesamten Fragenkomplex umreißen zu können.

Wenn auch die zunehmenden Planungen von Kraftwerken in erster Linie Anlaß dafür waren, den Einfluß der Wärmeenergie im Gewässer genauer zu überprüfen, darf nicht übersehen werden, daß auch aus anderen Betrieben Kühlwasser eingeleitet wird. Das muß bei der Gesamtbeurteilung berücksichtigt werden. In den nachfolgenden Kapiteln wird daher von Warmwassereinleitungen schlechthin gesprochen. Dabei werden die Folgen der Einleitung kühleren Wassers (künstlich oder natürlich) hier nicht behandelt, ebenso nicht die Einleitung geringfügiger Wärmemengen.

Die nach dem Gesetz über Einheiten im Meßwesen vom 2. 7. 1969 (BGBl. I S. 709) und der Ausführungsverordnung zum Gesetz über Einheiten im Meßwesen vom 26. 6. 1970 (BGBl. I S. 981) festgelegten Meßgrößen – berücksichtigt in der DIN 1301 – November 1971 – wurden in die Grundlagen übernommen. In dem nachstehenden Auszug aus den Vorschriften sind die wesentlichen, hier interessierenden Einheiten aufgeführt:

1. Basiseinheiten

Basiseinheit	Kurzzeichen	Basisgröße
Meter	m	Länge
Kilogramm	kg	Masse
Sekunde	s	Zeit
Ampère	A	Elektr. Stromstärke
Kelvin	K	Thermodynamische Temperatur
Candela	cd	Lichtstärke
Mol	mol	Stoffmenge

2. Abgeleitete Einheiten (Auszug)

Quadratmeter	m ²	Fläche
Kubikmeter	m ³	Volumen
Minute-Stunde-Tag	min – h – d	Zeit
Newton	1 N = 1 kg m/s ²	Kraft
Pascal	1 Pa = 1 N/m ²	Druck, Spannung
Bar	1 bar = 10 ⁵ Pa	Druck (Meteorologie)
Joule	1 J = 1 Nm = 1 Ws	Energie, Arbeit, Wärmemenge
Watt	1 W = 1 J/s = 1 Nm/s	Leistung, Energie, Wärmestrom

3. Bemerkung

Temperaturdifferenzen und Temperaturen bezogen auf den absoluten Nullpunkt (-273,15° C) werden mit K (Kelvin) bezeichnet, während die Temperaturen, die sich auf den Schmelzpunkt des Eises beziehen, mit °C (Grad Celsius) bezeichnet werden.

4. Vorsätze

Vielfaches	Vorsatz	Kurzzeichen	Teil	Vorsatz	Kurzzeichen
10 ¹²	Tera	T	10 ⁻¹	Dezi	d
10 ⁹	Giga	G	10 ⁻²	Zenti	c
10 ⁶	Mega	M	10 ⁻³	Milli	m
10 ³	Kilo	k	10 ⁻⁶	Mikro	µ
10 ²	Hekto	h	10 ⁻⁹	Nano	n
10	Deka	da	10 ⁻¹²	Piko	p
			10 ⁻¹⁵	Femto	f
			10 ⁻¹⁸	Atto	a

5. Am 31. 12. 1977 auslaufende Einheiten (Auszug)

Ångström	Å
Pond	P
Dyn	dyn
Atmosphäre	at, atü, ata, atu
Flüssigkeitssäulen	mWS, mm Hg
Torr	Torr
Poise	P
Stokes	St
Kalorie	cal
Pferdestärke	PS

Umrechnungstabellen

1. Aus den in Zukunft nicht mehr zulässigen Einheiten ergeben sich folgende Werte in den neuen gesetzlichen Einheiten:

1 kp/cm ² 1 at	}	0,98067 bar
1 m WS		0,098067 bar
1 mm Hg 1 Torr	}	1,33322 mbar
1 kpm		(J 9,80665 (Nm (Ws
1 cal	(J 4,18680 (Nm (Ws	
	1 kcal = 4,18680 kJ 1 Mcal = 4,18680 MJ 1,16300 kWh	
1 kp		9,80665 N
1 kpm/s	(W 9,80665 (J/s (Nm/s	
1 PS (= 75 kpm/s)	0,7355 (kW (kJ/s	

2. Die neuen gesetzlichen Einheiten beinhalten folgende Werte in nicht mehr zulässigen Einheiten

1 bar	1,019716 (kp/cm ² (at 10,19716 mWS
1 mbar	0,75006 (mm Hg (Torr
1 J (= Nm = Ws)	0,10197 kpm 0,23885 cal 1 kJ 0,23885 kcal 1 MJ 0,23885 Mcal
1 W (= J/s = Nm/s)	0,10197 kpm/s 1 kW 101,97 kpm/s 1,35962 PS
1 kWh (= 3600 kJ) 1MWh (= 3600 MJ)	859,845 kcal 859,845 Mcal

3. Anmerkung:

1 t SKE (Steinkohleneinheit = 7000 Mcal)
= 29308 MJ

II. Kapitel

Kriterien bei der Beurteilung von Wärmeeinleitungen in Gewässer

1. Gewässertemperaturen

1.1 Natürliche Gewässertemperaturen, Maximalwerte, Dauerzahlen

Fließgewässer haben wegen ihrer Turbulenz im allgemeinen im gesamten Abflußquerschnitt die gleiche Temperatur. Sie ist in der Regel im Jahresmittel höher als die mittlere Lufttemperatur. Ausgenommen hiervon sind Gletscherflüsse und Gebirgsflüsse, die im Sommer kühleres Wasser führen (Abb. 1).

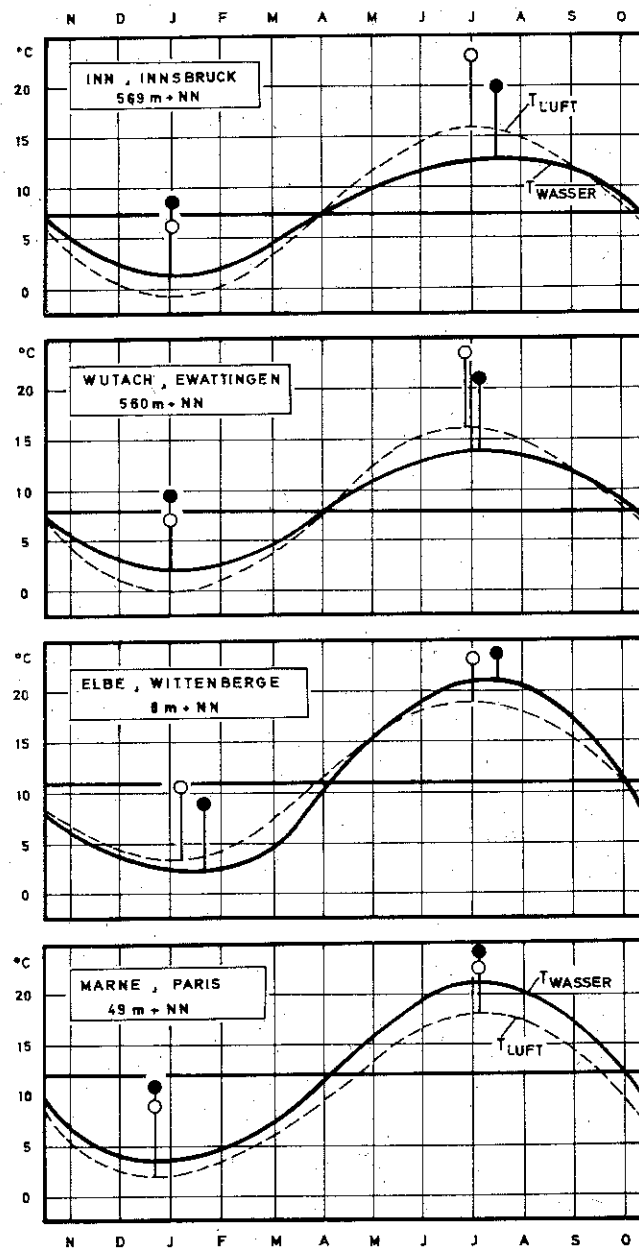


Abb. 1:
Charakteristische Jahresganglinien
der Flußwasser-Temperaturen (mit
Luft-Temperaturen zum Vergleich)
(19)

Entsprechend den jeweils maßgebenden Geofaktoren können in den hiesigen Breiten aufgrund ihrer natürlichen Temperaturmaxima bei Fließgewässern folgende Gewässertypen unterschieden werden:

1. Ständig kühle Fließgewässer (Temperatur bleibt im niedrigen Temperaturbereich und schwankt verhältnismäßig geringfügig in Hochgebirgslagen je nach Höhenlage um einen Mittelwert zwischen etwa + 5 °C bis + 10 °C oder bei Gletscherflüssen im Bereich des Gefrierpunktes).
2. Sommerkühle Fließgewässer in Gebirgslagen, Gebirgsrandlagen oder Mittelgebirgen.
3. Sommerwarme Fließgewässer.

Temperaturveränderungen natürlicher Fließgewässer verlaufen in Abhängigkeit von den meteorologischen Verhältnissen mitunter sehr rasch. Die Tagesschwankungen können mehr als 3 K betragen.

Bei gleichbleibender Wetterlage würde sich die Temperatur des Oberflächenwassers auf einen bestimmten Wert einstellen, der durch das Gleichgewicht zwischen Wärmezufuhr und Wärmeabgabe gekennzeichnet ist. Die Temperatur, bei der also der effektive Wärmeaustausch zu Null wird, bezeichnet man als „Gleichgewichtstemperatur“. Naturgemäß ist jedoch die Gleichgewichtstemperatur ständigen Änderungen unterworfen, weil die Voraussetzung gleichbleibender meteorologischer Bedingungen selbst innerhalb kurzer Zeitabschnitte nicht gegeben ist. Liegt die Wassertemperatur über der Gleichgewichtstemperatur, so wird die Wärmeabgabe die Wärmeaufnahme so lang übersteigen, bis sich das Gleichgewicht eingestellt hat. Das Umgekehrte erfolgt bei zu niedriger Wassertemperatur.

Im Quellbereich der Flüsse befindet sich die Wassertemperatur in der Regel im Sommer unter, im Winter über der Gleichgewichtstemperatur. Im Sommer ist deshalb von der Quelle flussabwärts eine Temperaturzunahme zu beobachten.

Bei tieferen Seen werden im Gegensatz zum Fließgewässer jahreszeitlich bedingt deutliche Temperaturschichtungen beobachtet (Abb. 4). Zu bestimmten Jahreszeiten ist das Wasser von der Oberfläche bis zum Grund durchmischt (Frühjahrs- und Herbstvollzirkulation). Die im Sommer gespeicherte Wärme wurde abgegeben. Der Tiefpunkt der einheitlichen Mischtemperaturen eines Sees entspricht in der Regel der Temperatur bei der größten Wasserdichte (+ 4 °C). Starker Frost und Windstille bringen an der Oberfläche weitere Abkühlung und Vereisung (Schichtung entsprechend der geringeren Dichte, Winterstagnation). Im Bereich der gleichmäßigen kalten Wassertemperaturen um + 4 °C im Herbst und Frühjahr ist die Schichtung des Sees indifferent, bei Wind gerät der Wasserkörper in Bewegung und wird bis zum Grunde umgewälzt (Herbst- und Frühjahrszirkulation). Die Erwärmung des Oberflächenwassers zu Beginn des Sommers bewirkt vor allem bei tieferen Seen allmählich eine deutliche Temperaturschichtung (Metalimnion) von der kalten Tiefenschicht (Hypolimnion), deutlich getrennt. Umwälzungen durch Wind erfolgen im Sommer nur noch innerhalb der Oberflächenschicht; die Tiefenschicht wird nicht mehr erreicht (Sommerstagnation). Erst die Abkühlung ermöglicht wieder die vollständige Zirkulation.

Bei flachen Seen kann sich keine Sprungschicht ausbilden; hier kann im Sommer eine allmähliche Erwärmung bis zum Grunde des Gewässers erfolgen. In Grundwasserseen (Baggerseen, Kiesgruben) kann sich in der gesamten Wassermenge in den Monaten Juli bis September eine einheitliche Temperatur über die ganze Tiefe ausbilden. (Abb 5). In kleineren Seen und Teichen können Spitzentemperaturen um 27° C und höher auftreten.

Angaben über Wassertemperaturen von Fließgewässern, Seen und Grundwasser, die auch den

jahreszeitlichen Gang der Temperaturen erkennen lassen, sind in den Deutschen Gewässer- kundlichen Jahrbüchern, deren Ergänzungsheften sowie im „Allgemeinen Teil“ der DGJ enthalten. Im Zusammenhang mit den ebenfalls angegebenen Abflüssen können für Fließge- wässer Wärmefrachten errechnet werden (vgl. Kap. 4).

See-Isothermen werden z. Z. nur für den Bodensee veröffentlicht.

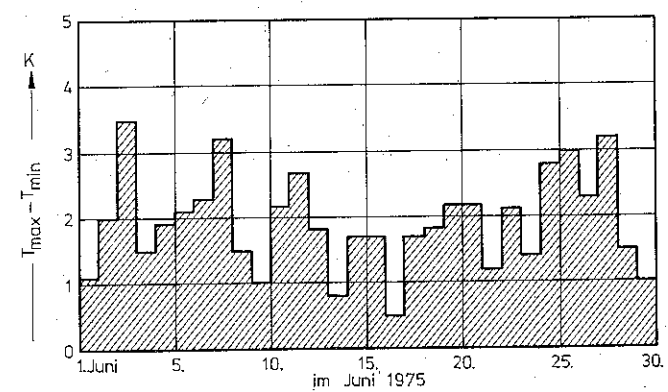
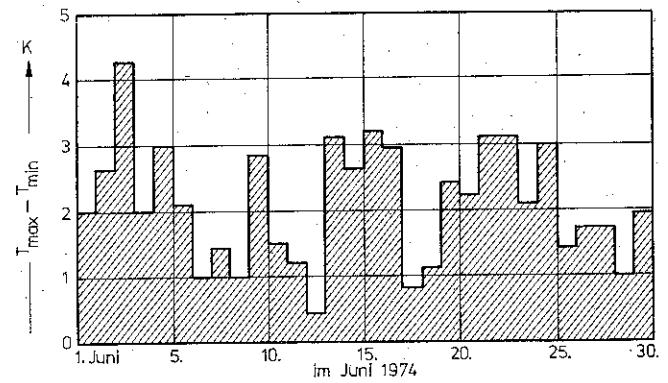
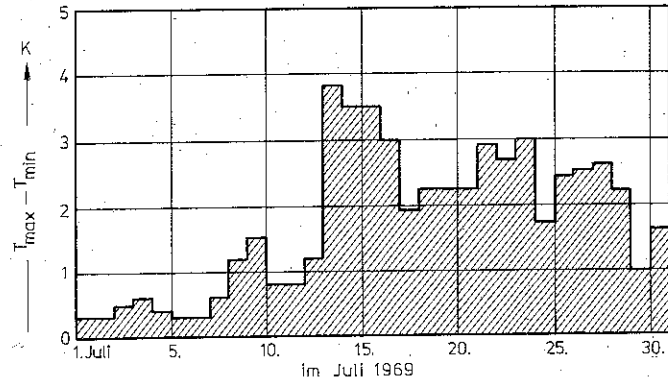


Abb. 2a:
Tagesschwankungen der Wasser-
temperatur am Pegel Hüttendorf/
Regnitz

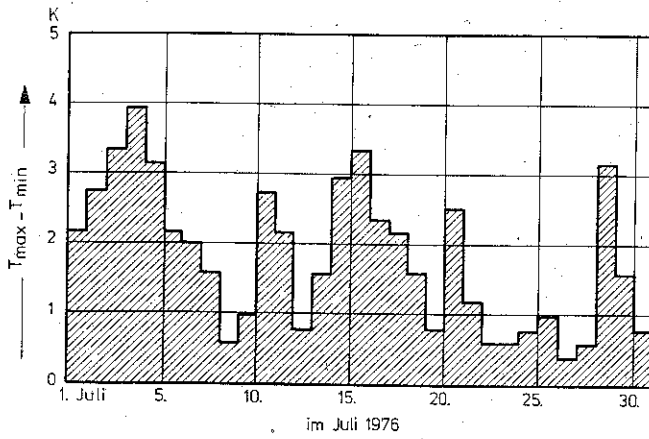
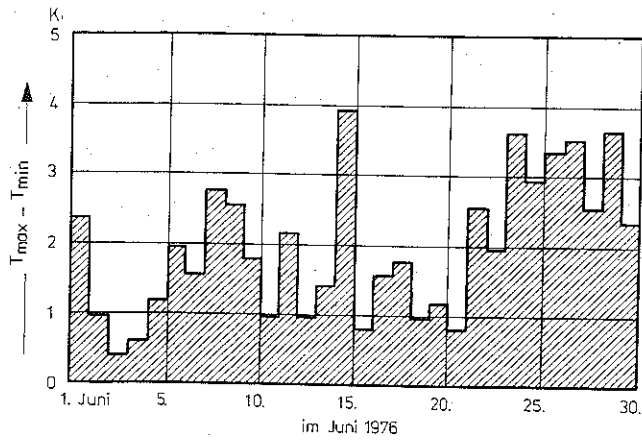


Abb. 2b:
Tagesschwankungen der Wassertemperatur an der Meßstelle Garstadt/Main

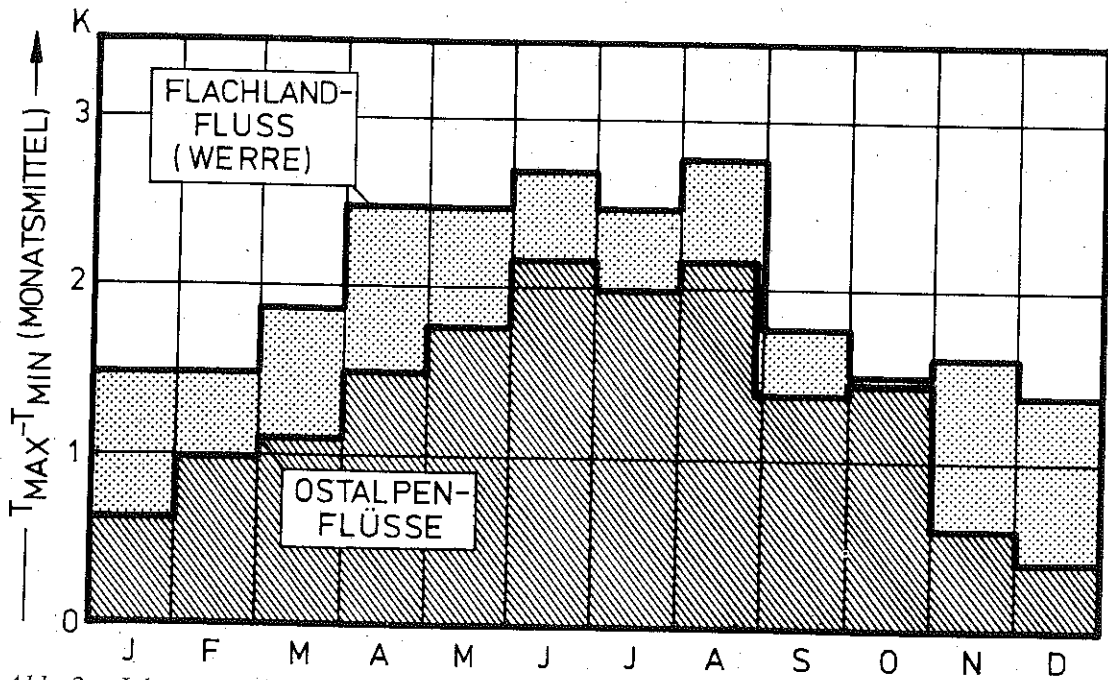


Abb. 3a: Jahrgang der Monatsmittel der Tagesschwankungen (19)

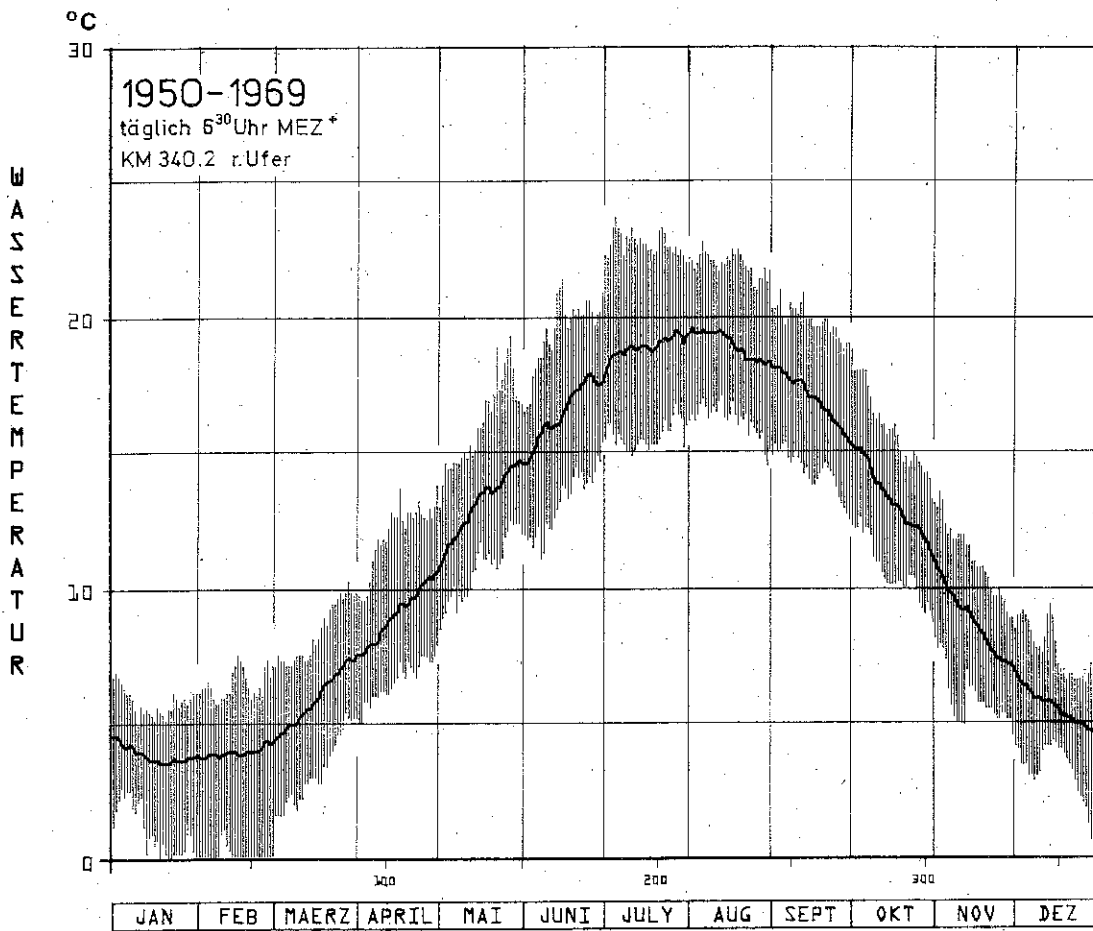


Abb. 3b: Minimum, Mittelwert und Maximum der täglichen Terminwerte der Wassertemperatur am Pegel Plittersdorf (Jahresreihe 1950 – 1969)

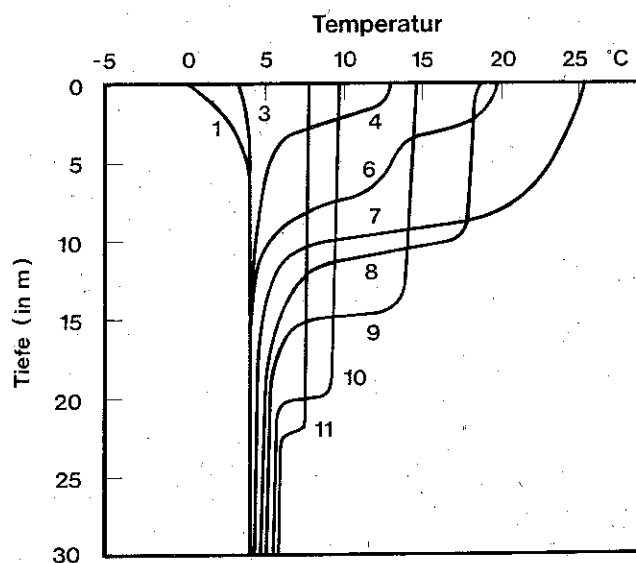


Abb. 4a:
Temperaturprofil eines geschichteten Sees (nach OHLE)

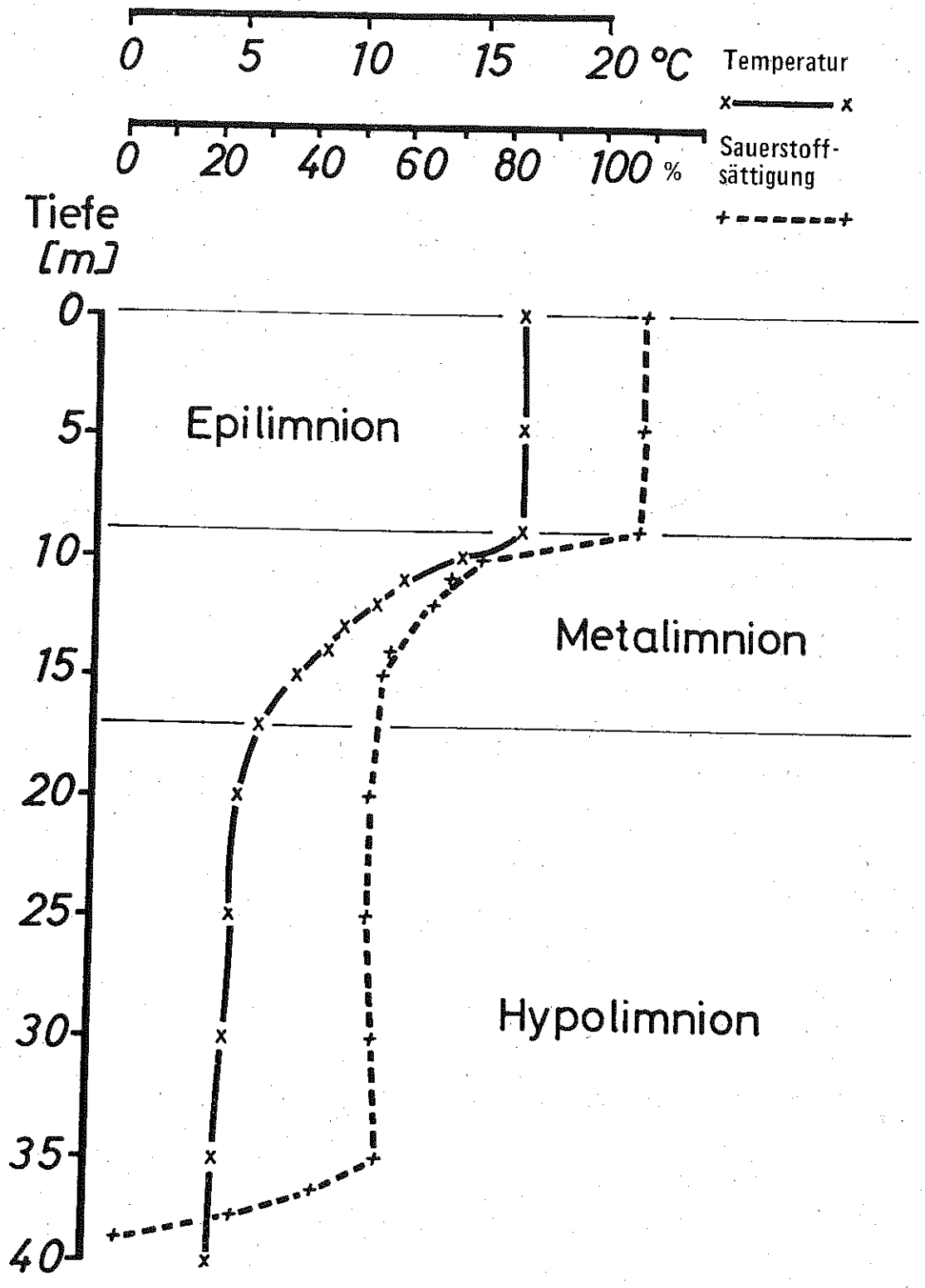
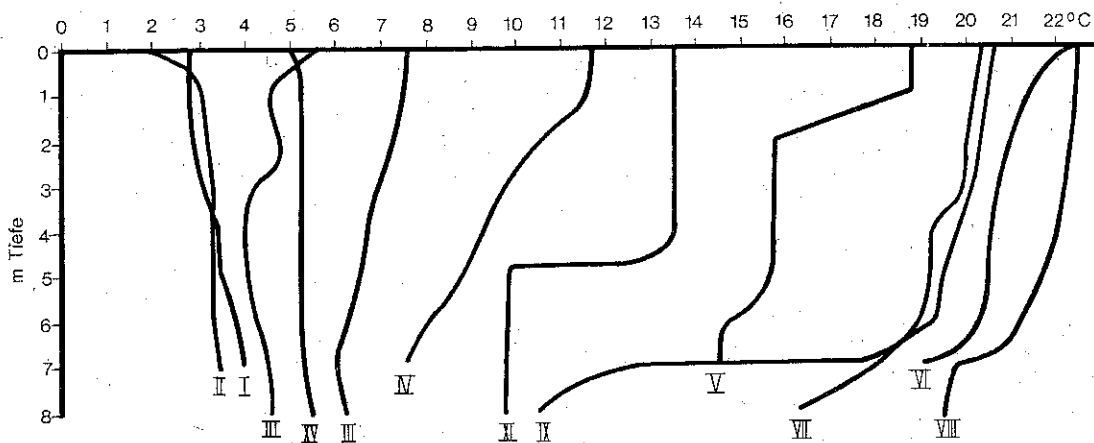


Abb. 4b: Tiefenprofil der Wassertemperatur und des Sauerstoff-Sättigungsindex einer Talsperre bei Sommerstagnation – Wahnbachtalsperre, gemessen am 10. 9. 1963 – (KfK, ATV, DVGW, Arbeitsblatt AW 161, Jan. 1971)

Wassertemperaturen in der Kiesgrube Liedolsheim.

Die jeweiligen Monate sind durch röm. Ziffern gekennzeichnet.



Schematischer Verlauf der Temperaturkurven in einer Kiesgrube

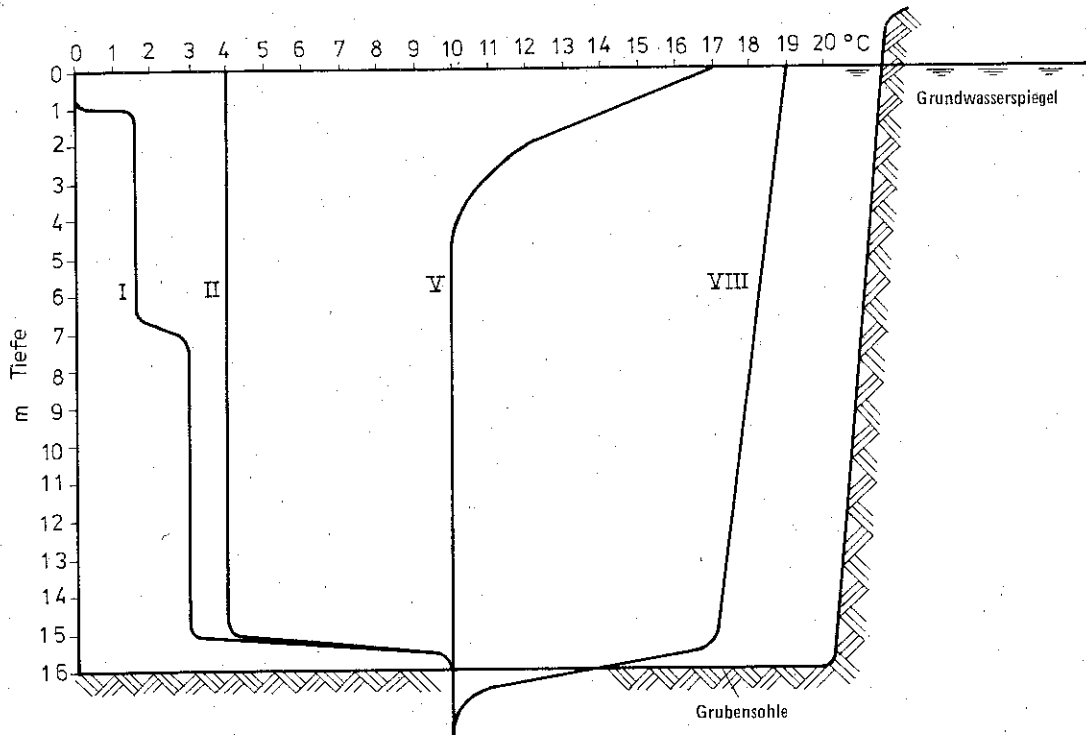


Abb. 5: Wassertemperaturen in Kiesgruben (25)

1.2 Aus thermischen Kraftwerken abzuführende Wärmemengen

Die in thermischen Kraftwerken aus fossilen Brennstoffen oder durch Kernspaltung gewonnene Wärme kann nur zum Teil in elektrischen Strom umgewandelt werden, der Rest geht entweder als Energieverlust durch Abgase, Schlacken, Abdampf, Wärmeleitung und Wärmestrahlung verloren oder muß als Abwärme abgeleitet werden. Sofern die Abwärme nicht wirtschaftlich verwertet werden kann (z. B. zu Heizzwecken), wird sie entweder an die Luft oder in ein Gewässer abgegeben, dabei werden Luft oder Wasser erwärmt.

In modernen Kraftwerken mit fossilen Brennstoffen werden heute Gesamtwirkungsgrade (= Verhältnis von elektrischer Leistung zur Primärleistung) von 35–42 % – in Zukunft vielleicht noch etwas darüber – erreicht. Bei heutigen Kernkraftwerken (Druck- und Siedewasserreaktoren) liegt der Wirkungsgrad bei 30–35 %. Bei gasgekühlten Reaktoren werden ähnliche Gesamtwirkungsgrade wie bei konventionellen Wärmekraftwerken erreicht. Die Energieverluste durch Abgase, Schlacken, Abdampf, Wärmeleitung und Wärmestrahlung betragen bei konventionellen thermischen Kraftwerken 6–15 %, bei Kernkraftwerken 2–6 %. Dementsprechend müssen bei konventionellen Kraftwerken 45–54 % und bei Druck- und Siedewasserreaktoren 60–65 % der Primärenergie als Abfallwärme abgeleitet werden, das ist also in jedem Fall mehr als das Äquivalent der elektrischen Leistung der Kraftwerke (Stand der Technik: das 1,4- bzw. 2fache des Äquivalents der elektrischen Leistung). Es versteht sich von selbst, daß sich Wissenschaft und Technik intensiv bemühen, den Wirkungsgrad der Kraftwerke weiter zu verbessern. Auch werden die verschiedensten Nutzungsmöglichkeiten der Abwärme derzeit in größerem Umfange untersucht. Es bleibt zu hoffen, daß diesen Bemühungen, insbesondere auch aus volkswirtschaftlichen Gründen, ein Erfolg beschieden ist.

Ein konventionelles thermisches Kraftwerk wird daher je 100 MW elektrische Leistung eine Wärmemenge von 125–170 MJ/s an die Umgebung (Wasser, Luft) abgeben. Für ein Kernkraftwerk gleicher elektrischer Leistung mit Siede- oder Druckwasserreaktoren kann die Wärmemenge zwischen 170 MJ/s und 225 MJ/s liegen.

Wie bereits oben angedeutet, müssen die genannten Wärmemengen nicht in allen Fällen an die Umgebung abgeleitet werden. Auch eine zeitweilige Nutzung in der Land- und Fischwirtschaft ist möglich; jedoch ist abzusehen, daß nur ein kleiner Teil der Abwärme auf diese Weise genutzt werden kann.

Die Hauptmenge des elektrischen Stromes wird in Kraftwerken ohne Abwärmeverwertung gewonnen. Um das notwendige Druckgefälle im Wasser-Dampf-Kreislauf zu erzeugen, wird der zunächst im Kessel erzeugte Dampf hinter der Dampfturbine im Kondensator abgekühlt und dabei wieder als Wasser niedergeschlagen.

Für die Kühlung der Kondensatoren mit Wasser ist vor allem zwischen den grundlegenden Systemen

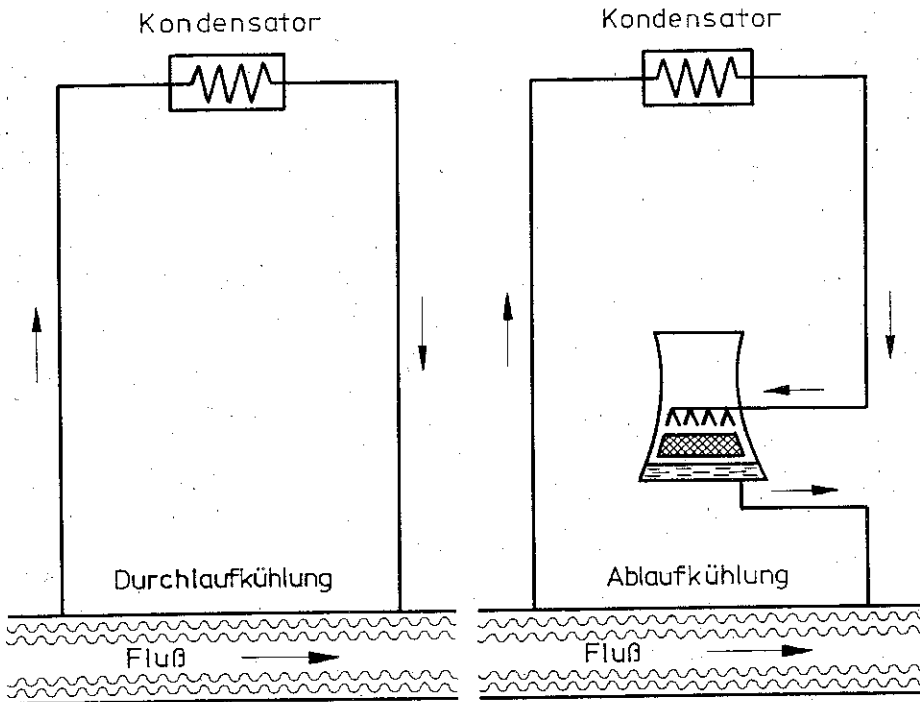
1. Frischwasserkühlung
und
2. Rückkühlung

zu unterscheiden. Bei der Frischwasserkühlung wird die gesamte Abwärme einem Gewässer zum Abtransport zugeführt. Bei Rückkühlung wird das Kühlwasser in einem Kühlturm wiederholt abgekühlt und den Kondensatoren zugeleitet (vgl. Kap. III). Dazwischen gibt es viele Möglichkeiten der Koppelung der Systeme (Abb. 6). Sie reichen von der Führung der gesamten Kühlwassermenge über einen Kühlturm vor Einleitung in das Gewässer (offene Rückkühlung mit „Ablaufkühltürmen“) bis zum Ansaugen eines bereits in demselben Werk erwärmten Wassers nach Abkühlung im Fluß (Abb. 8).

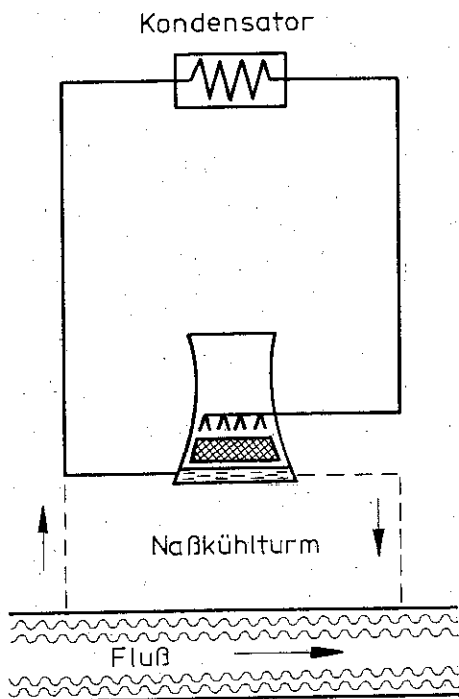
Die offene Rückkühlung (ganz oder teilweise) hat vor allem dort Bedeutung, wo zwar eine ausreichende Wassermenge zur Verfügung steht, die zulässigen Temperaturen im Gewässer bei voller Wärmeabgabe jedoch überschritten werden.

Bei geschlossener Rückkühlung ist zwischen „nassen“ und „trockenen“ Kühltürmen zu unterscheiden. Nasse Kühltürme geben die Wärme hauptsächlich über die Verdunstung ab; es ist erforderlich, die entstehenden Wasserverluste zu ersetzen und durch Abfluten den Salzgehalt

FRISCHWASSERKÜHLUNG



OFFENE RÜCKKÜHLUNG



GESCHLOSSENE RÜCKKÜHLUNG

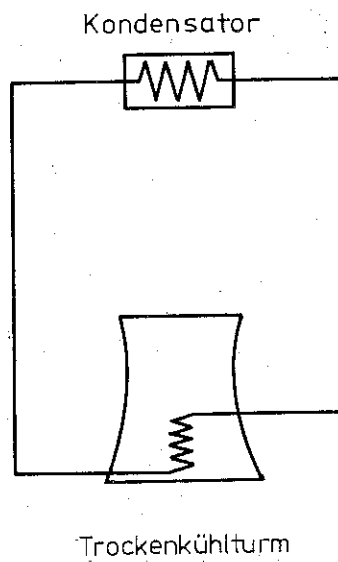
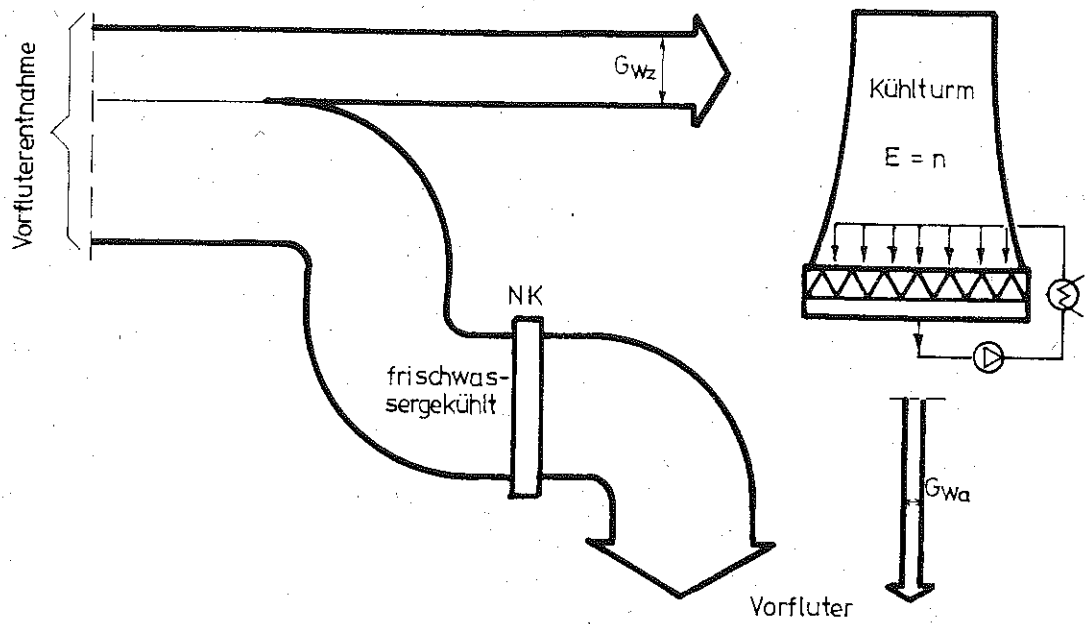


Abb. 6: Kühlsysteme

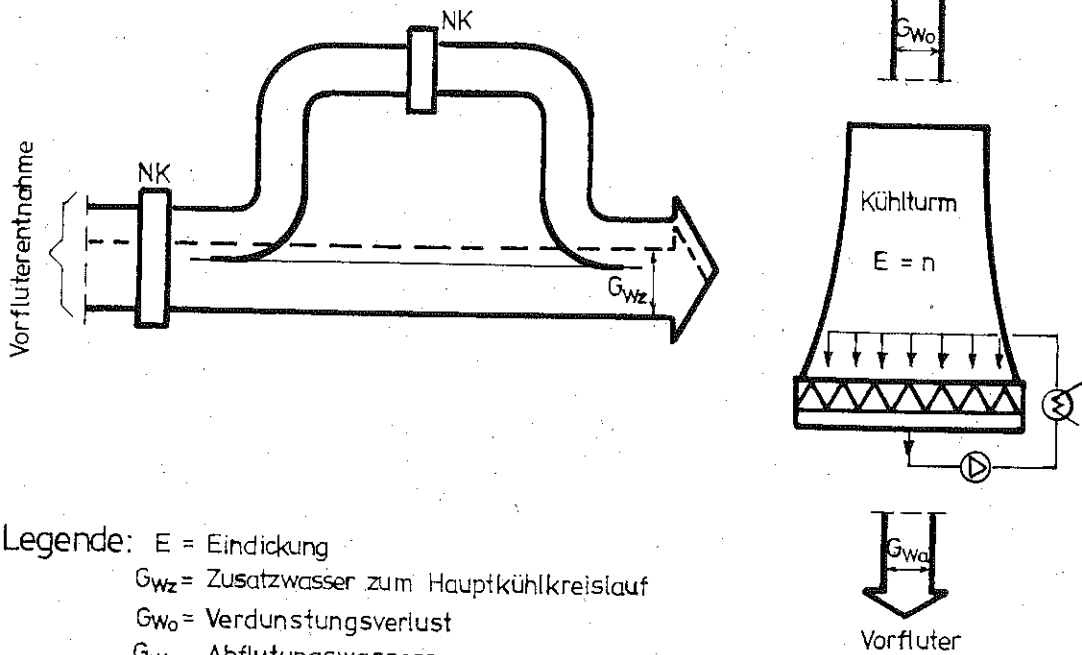
Offene Schaltung

(NK geben Abwärme voll an Vorfluter)



Integrierte Schaltung

(NK geben Abwärme über Kühlturm ab)



Legende: E = Eindickung

G_{Wz} = Zusatzwasser zum Hauptkühlkreislauf

G_{W0} = Verdunstungsverlust

G_{Wa} = Abflutungwassermenge

NK = Nebenkühlstellen

Abb. 7: Kernkraftwerk mit nasser Rückkühlung – offene und integrierte Schaltung der Nebenkühlstellen (NK) – (24)

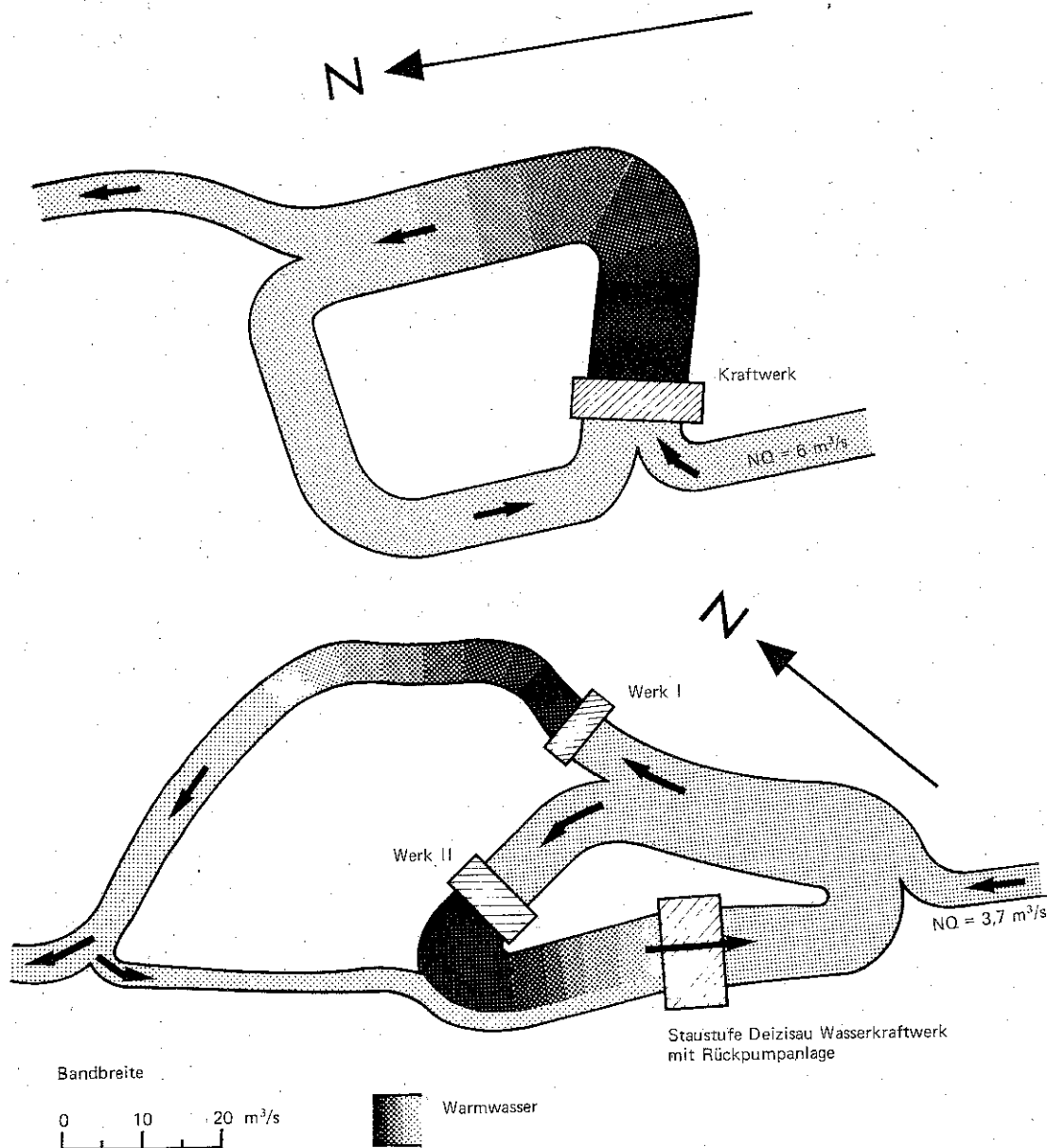


Abb. 8: Durchflussschemata des Kühlwassers der Dampfkraftwerke Heilbronn und Altbach bei Niedrigwasser des Neckars (NQ) und Vollast (1)

des umlaufenden Kühlwassers auf einem gefahrlosen Niveau zu halten. In Zukunft wird neben den reinen Naßkühlverfahren auch eine kombinierte Naß-Trockenkühlung (Hybridkühlturm) bzw. die Trockenkühlung an Bedeutung gewinnen, um die Gewässer weitgehend vor Verdunstungsverlusten und Abwärme zu bewahren. Bei Trockenkühlung entfällt eine Gewässerbenutzung weitgehend. Die Anwendbarkeit der Trockenkühlung wird in größerem Maßstabe gegenwärtig bei dem Projekt Schmehausen erprobt.

Neben dem Hauptkühlkreislauf existieren im Kraftwerk noch die sog. Nebenkühlstellen, bei denen Abwärme in der Größenordnung von 3 % bis 4 % (250 MJ/MWh) des Hauptkühlkreises anfällt. (Abb. 7) Bei konventionellen Kraftwerken wird bei Anwendung der nassen Rückkühlung die Abwärme aus beiden Stellen gemeinsam rückgekühlt. Die Nebenkühlstellen bei Kernkraftwerken werden dagegen oft mittels Durchlaufkühlung gekühlt.

Die Wärmebelastung des Gewässers wird durch die eingeleitete Wärme (das ist das Produkt aus Kühlwassermenge und Temperaturdifferenz des Kühlwassers zwischen Entnahme- und Einleitungsstelle) bestimmt. Durch die Wärmemenge von 4.2 MJ wird ein Kubikmeter Wasser um ein Kelvin erwärmt.

1.3 Die Temperaturverteilung nach Warmwassereinleitungen (Mischungsvorgang)

1.3.1 Temperaturverteilung in Fließgewässern

Die über Kühlwasser einem Fluß zugeführte Wärme verteilt sich durch Wärmeleitung, durch Konvektion und durch Vermischung nach einem kürzeren oder längeren Zeitraum mehr oder weniger gleichmäßig auf den gesamten Abfluß. Zeitspanne und Fließweg, nach denen sich der Temperaturengleich einstellt, hängen von der Gestaltung des Einleitungsbauwerkes in Zusammenhang mit der Art und der Strömung des Fließvorganges (Geschwindigkeitsverteilung) des Flusses, vom Temperaturunterschied zwischen Kühlwasser und Flußwasser sowie von jeweiligen örtlichen Gegebenheiten ab.

Die Wärmeleitung geht verhältnismäßig langsam vor sich. Sie spielt bei der Wärmeausbreitung in einem Fließgewässer gegenüber der Konvektion und der Vermischung durch turbulente Strömung kaum eine Rolle.

Infolge seiner verminderten Dichte hat das wärmere Kühlwasser die Tendenz, sich an der Oberfläche des Vorfluters auszubreiten. Dieser Vorgang könnte sich allerdings nur bei Einleitung des warmen Wassers als laminare Strömung in ein stehendes Gewässer (See, Kanal) oder laminar strömendes Gewässer (Stauhaltungen) in begrenzten Bereichen ungestört vollziehen.

Kühlwasser wird als turbulente Strömung in normalerweise turbulent fließende Gewässer eingeleitet. In kleinen und schmalen Gewässern stellt sich bei diesen Verhältnissen schon bald unterhalb der Einleitungsstelle völlige Durchmischung ein. Handelt es sich jedoch um breite Vorfluter und um kleine Kühlwassermengen im Vergleich zur Wasserführung des Vorfluters, dann mischt sich das Kühlwasser nur allmählich mit dem gesamten Wasserkörper, so daß sich am Einleitungsufer eine Zone mit erhöhter Wassertemperatur bildet, die oft viele Kilometer nachweisbar bleibt.

Die Warmwasserfahne wird definiert als Wasserkörper, der eine effektive Übertemperatur gegenüber dem umgebenden Wasserkörper aufweist. Diese Grenze ergibt sich erst oberhalb von 1 K.

Bei Einleitungen in größere Fließgewässer (z. B. Rhein,) vermischt sich das Kühlwasser schon innerhalb der ersten 200 bis 1000 m mit mindestens der vierfachen Flußwassermenge. Bei gestauten Flüssen (z. B. Neckar, Mosel) mischt sich das Wasser unter Umständen mäandierend ein; nach spätestens 2 Stunden Fließzeit (ca. 0,5–2 km Fließweg) ist die Vermischung so weit fortgeschritten, daß die Temperaturunterschiede im Flußquerschnitt kleiner als 20 % der Temperaturerhöhung an der Einleitungsstelle sind.

Bei geringerer Fließgeschwindigkeit (staugeregelte Flüsse), wenn die Kühlwasserentnahme einen großen Teil des Abflusses beansprucht, oder einem nahezu gleichen Verhältnis von Kühlwasserentnahme und Abfluß besteht die Möglichkeit, daß erwärmtes Wasser nochmals in das Entnahmebauwerk gelangt (Abb. 8). Die jeweilige günstige Gestaltung von Entnahme- und Einleitungsbauwerken läßt sich aus Modellversuchen ermitteln. Auch den Belangen der Schifffahrt kann dabei Rechnung getragen werden (Querströmungen).

1.3.2 Temperaturverteilung in Seen

Während bei der Einleitung von Kühlwasser in ein fließendes Gewässer örtlich eine gewisse Erwärmung erfolgt, die zugeführte Wärme aber ständig von der Einleitungsstelle weggeführt wird, wird bei einem stehenden Gewässer mit genügender Tiefe die eingeleitete Wärme im Sommerhalbjahr teilweise gespeichert und im Winterhalbjahr wieder abgegeben. Bei der Einleitung warmen Wassers, die meist aus technischen Gründen als turbulente Strömung erfolgt, kann sich in einem See nur in ganz bestimmten Fällen eine Temperaturschichtung ausbilden und halten. Eingriffe in die Seethermik können während der Sommerstagnation zu erheblichen vertikalen Wasserumwälzungen des Sees führen (s. Kap. II 1.1 u. II 1.3.1). Grundsätzlich wird bei der Einleitung von Kühlwasser zu berücksichtigen sein, ob sich im Sommer eine deutliche Temperaturschichtung mit einer Sprungschicht ausbildet (tiefe Seen) oder nicht (flache Seen).

Die Rückgabe von Kühlwasser in die Entnahmeschicht begünstigt einen Wärmekurzschluß. Zwischen Entnahme und Rückleitung sollte daher nicht nur örtlich, sondern auch in der Tiefenlage ein genügender Abstand bestehen. Günstige Voraussetzungen liegen vor, wenn die natürliche Form eines Gewässers einen weiten Weg des Warmwassers bei geringer Länge der Kühlwasserleitungen ermöglicht (z. B. Halbinsel).

Kleinere Seen kommen für die Kühlwassernutzung größeren Ausmaßes nur in Betracht, wenn sie wie „Kühlteiche“ betrieben werden können. Hierüber liegen umfangreiche Erfahrungen über den Kühlteich „Wölfersheimer Teich“ vor, der als ehemalige Braunkohlentagebaugrube eine Oberfläche von 370.000 m² und einem Inhalt von 3,5 Millionen m³ besitzt. Unter Hinzuziehung der Sprühdüsenanlage, die durch 2.100 Düsen etwa die Hälfte des Kühlwassers auf einer Fläche von 15.000 m² versprüht, kann in diesem Falle eine elektrische Kraftwerksleistung von 124 MW gekühlt werden.

1.3.3 Temperaturverteilung im Grundwasser

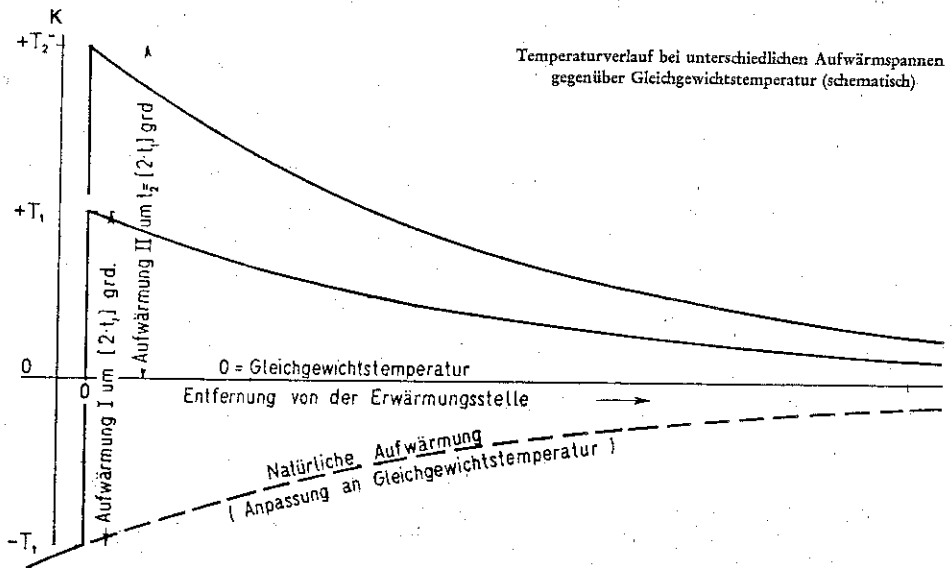
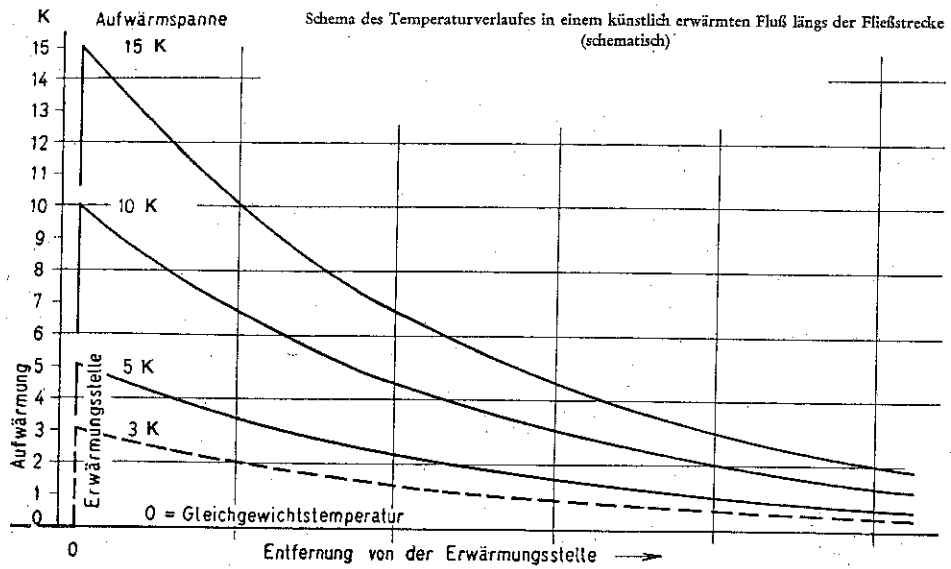
Eine direkte Einleitung erwärmten Wassers in das Grundwasser mittels künstlicher Versickerung kommt nur für kleine Wärme- bzw. Wassermengen in Frage.

Da die Grundwasserströmung eine weitgehende parallele Bewegung aufweist, erfolgt die seitliche Durchmischung nur langsam. Eine punktförmige Einleitung von Kühlwasser wird zu einer erwärmten Fahne in Strömungsrichtung führen. Versickerungsanlagen sind daher quer zur Grundwasserfließrichtung anzuordnen. Eine gute Durchmischung im Grundwasserkörper ist technisch jedoch kaum zu erreichen, deshalb sollte die Temperatur des eingeleiteten warmen Wassers nur wenig über der Grundwassertemperatur liegen. Der zuzulassende Wärmeeintrag ist unter Berücksichtigung der Grundwasserfließverhältnisse festzulegen.

1.4 Abkühlung

Die Vorgänge des Wärmeaustausches zwischen Gewässern und Umgebung (vor allem der Atmosphäre) sind qualitativ und quantitativ ($\pm 10\%$) bekannt. Für die Vorausberechnungen der Abkühlung künstlicher erwärmter Gewässer sind die entsprechenden Beiwerte durch zusätzliche Untersuchungswerte zu begründen.

Nach den theoretischen Grundlagen und den vorliegenden Erfahrungen lassen sich qualitative und quantitative Aussagen machen, wobei als Voraussetzung festzuhalten ist, daß Abkühlung oder Erwärmung einer exponentiellen Funktion folgen (s. Abb. 9)



Beispielfall Temperaturverlauf bei aufeinanderfolgenden Kühlwassernutzungen (schematische Beispiele)

- I (—) Ein angenommener Temperaturverlauf
- II (---) Temperaturverlauf bei Erhöhung der Aufwärmspanne bei A um 50 %
- III (---) Temperaturverlauf bei Vorverlegen der nachfolgenden Kühlwassernutzung

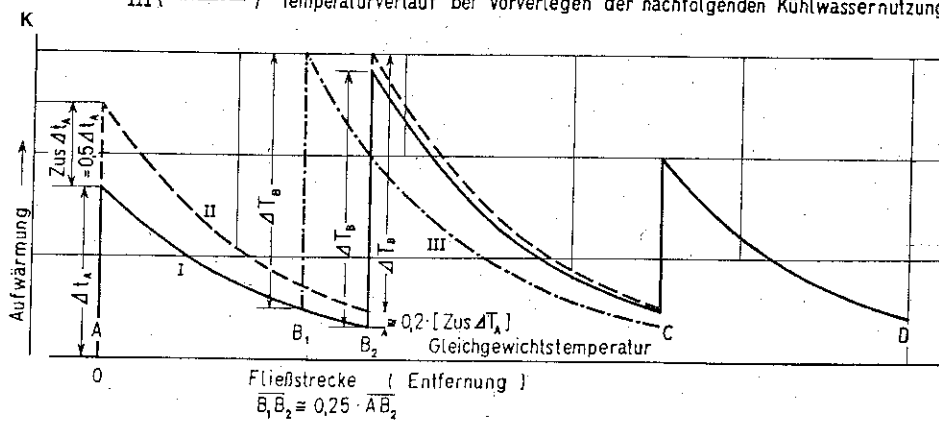


Abb. 9: Beispiele für den Temperaturverlauf in künstlich erwärmten Flüssen (4)

1. In Oberflächengewässern passen sich die Temperaturen mit Verzögerung der durch die Witterungsverhältnisse bedingten Gleichgewichtstemperatur (s. Kap. II 1.1) an.
2. Die Austauschvorgänge (Erwärmung oder Abkühlung) sind um so intensiver (Wärmemenge/Zeiteinheit), je größer der Unterschied zwischen der tatsächlichen und der Gleichgewichtstemperatur ist (Abb. 9). Bei geringfügigen positiven Unterschieden ist die Abkühlung daher so gering und die Fehlerwahrscheinlichkeit so groß, daß aus Messungen in solchen Strecken nur mit großen Fehlern auf die Abkühlungsgeschwindigkeit des Wassers nach starken Aufwärmungen geschlossen werden kann.
3. Nach der Abkühlung künstlich erwärmten Flußwassers bis wenig über der Gleichgewichtstemperatur verbleibt eine Temperaturerhöhung, die erst nach langen Fließstrecken und Fließzeiten aus dem Wasser entweicht. Anteile der Erwärmung unterhalb der Gleichgewichtstemperatur sind die künstliche Vorwegnahme einer sonst allmählich eintretenden natürlichen Aufwärmung des Wassers auf seinem Fließgang (Abb. 9).

1.5 Wassertemperatur an der nächsten Kühlwasserentnahmestelle

In einem künstlich erwärmten Fluß hält eine Resterwärmung über relativ lange Fließzeiten und weite Fließstrecken an. (Kap. II 1.4.) Nachfolgende Nutzungen des erwärmten Wassers zu Kühlzwecken können in einer solchen Entfernung von der obenliegenden Erwärmungsquelle angeordnet werden, in der die Vorbelastung dies unter Einhaltung der Grenzwerte (Kap. VI) gestattet.

Verträgt die Nutzung eine höhere Temperatur des Zuflusses, kann sie näher an der obenliegenden Erwärmung angeordnet werden.

Die Grundsätze werden für den Fall, daß eine Abkühlung stattfindet, in Abb. 9 veranschaulicht. Es ist zu ersehen, daß

1. eine höhere Aufwärmspanne bei einer Nutzung (A) sich mit einem Bruchteil der zusätzlichen Erwärmung an der nachfolgenden Nutzungsstelle (B) auswirkt und
2. ein Vorverlegen der nachfolgenden Kühlwassernutzung bei gleichbleibender Aufwärmspanne an dieser Stelle (B₁) nicht zu einer entsprechenden Temperaturerhöhung flußabwärts führt.

Nähern sich die erhöhten Temperaturen einer festgesetzten oberen Temperaturgrenze, ist bei einer Vorverlegung der nachfolgenden Nutzung jedoch ein früheres Erreichen dieser oberen Grenze möglich und u. U. daraus resultierende Beschneidung der Aufwärmspanne ΔT_B .

2. Sauerstoffhaushalt

2.1 Ursprüngliche Sauerstoffverhältnisse

Die Sauerstoffverhältnisse in Vorflutern resultieren aus der Gesamtheit der Sauerstoff verbrauchenden und Sauerstoff liefernden Prozesse im Gewässer sowie aus den Austauschvorgängen mit der Atmosphäre. Der Sauerstoffgehalt unterliegt je nach Gewässertyp, Gewässerausbau und Gewässergüte mehr oder weniger großen Schwankungen in Abhängigkeit von Tages- und Jahreszeit, Abfluß und diskontinuierlicher Abwassereinleitung. Die Beweissicherung vor der Einleitung großer Kühlwassermengen und die Schaffung von Basismaterial für Prognosen (vgl. Kap. II, 2.3) erfordert deshalb eine Untersuchung des Sauerstoffhaushaltes im Bereich der späteren Aufwärmung und der daran anschließenden Flußstrecke. Soweit dabei nicht die Sauerstoffverhältnisse über mehrere volle Abflußjahre hinweg untersucht werden können, sollte zumindest ausreichendes Basismaterial für die ungünstigsten Phasen des Sauerstoffhaushaltes vorliegen. Solche Phasen sind: Zeiten geringer Abflüsse, hoher Wassertemperaturen oder hoher organischer Belastung, das Ende der Vegetationsperiode (Oktober/November). Als Basismaterial kann vor allem dienen:

- a) Mehrfache Aufnahme von Tag-Nacht-Ganglinien des Sauerstoffgehaltes besonders in der Vegetationsperiode (Mai bis Oktober) und zum Ende der Vegetationsperiode zur näheren Analyse der Tagesschwankungen, der Tagesminima und deren zeitlichen Lage (in gestauten Fließgewässern können diese Minima je nach Ort der Untersuchung in den Tag verschoben sein). Untersuchungsmaterial dieser Art kann bei Fehlen diskontinuierlicher Abwassereinleitungen gleichzeitig die Basis für Meßwerte nach d) liefern.
- b) Tägliche Werte des O_2 -Gehaltes (insbesondere in frei fließenden Gewässern möglichst Messungen vor Sonnenaufgang, bei gestauten Fließgewässern möglichst zur Zeit des täglichen O_2 -Minimums, vgl. a).
- c) Möglichst zutreffende Erfassung des biochemischen Sauerstoffbedarfs. Nach den bisherigen Erfahrungen genügt die Ermittlung des BSB_5 allein nicht, der biochemische Sauerstoffbedarf ist vielmehr auch für wesentlich kürzere Zeiträume zu bestimmen (BSB_2 , BSB_1 , BSB_{7h}). Es sollten Daten für das volle Abflußjahr vorliegen, um Prognosen nach II, 2.3 geben zu können. Notfalls können BSB_5 -Werte mit einigen Unsicherheiten auf BSB_2 und BSB_1 umgerechnet werden. Soweit möglich sollten solche Daten für $T = 20^\circ C$ sowie für die Temperatur des Flußwassers bei der Probeentnahme vorliegen.
- d) Tägliche Werte der Wassertemperaturen (vgl. II, 1.1), des Luftdruckes und des Salzgehaltes für Aussagen über die relativen Sauerstoffverhältnisse (Sauerstoffindex).

Tabelle zur Ermittlung der Sauerstoffsättigung in Abhängigkeit
 von der Temperatur bei einem Gesamtdruck der wasserdampfgesättigten
 Atmosphäre von 1013 mbar nach TRUESDALE, DOWNING und LOWDEN
 J. Appl. Chem. 5 (1955) 53

$t_{\text{°C}}$	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
	mg O ₂ /l									
0	14.16	14.12	14.08	14.04	14.00	13.97	13.93	13.89	13.85	13.81
1	13.77	13.74	13.70	13.66	13.63	13.59	13.55	13.51	13.48	13.44
2	13.40	13.37	13.33	13.30	13.26	13.22	13.19	13.15	13.12	13.08
3	13.05	13.01	12.98	12.94	12.91	12.87	12.84	12.81	12.77	12.74
4	12.70	12.67	12.64	12.60	12.57	12.54	12.51	12.47	12.44	12.41
5	12.37	12.34	12.31	12.28	12.25	12.22	12.18	12.15	12.12	12.09
6	12.06	12.03	12.00	11.97	11.94	11.91	11.88	11.85	11.82	11.79
7	11.76	11.73	11.70	11.67	11.64	11.61	11.58	11.55	11.52	11.50
8	11.47	11.44	11.41	11.38	11.36	11.33	11.30	11.27	11.25	11.22
9	11.19	11.16	11.14	11.11	11.08	11.06	11.03	11.00	10.98	10.95
10	10.92	10.90	10.87	10.85	10.82	10.80	10.77	10.75	10.72	10.70
11	10.67	10.65	10.62	10.60	10.57	10.55	10.53	10.50	10.48	10.45
12	10.43	10.40	10.38	10.36	10.34	10.31	10.29	10.27	10.24	10.22
13	10.20	10.17	10.15	10.13	10.11	10.09	10.06	10.04	10.02	10.00
14	9.98	9.95	9.93	9.91	9.89	9.87	9.85	9.83	9.81	9.78
15	9.76	9.74	9.72	9.70	9.68	9.66	9.64	9.62	9.60	9.58
16	9.56	9.54	9.52	9.50	9.48	9.46	9.45	9.43	9.41	9.39
17	9.37	9.35	9.33	9.31	9.30	9.28	9.26	9.24	9.22	9.20
18	9.18	9.17	9.15	9.13	9.12	9.10	9.08	9.06	9.04	9.03
19	9.01	8.99	8.98	8.96	8.94	8.93	8.91	8.89	8.88	8.86
20	8.84	8.83	8.81	8.79	8.78	8.76	8.75	8.73	8.71	8.70
21	8.68	8.67	8.65	8.64	8.62	8.61	8.59	8.58	8.56	8.55
22	8.53	8.52	8.50	8.49	8.47	8.46	8.44	8.43	8.41	8.40
23	8.38	8.37	8.36	8.34	8.33	8.32	8.30	8.29	8.27	8.26
24	8.25	8.23	8.22	8.21	8.19	8.18	8.17	8.15	8.14	8.13
25	8.11	8.10	8.09	8.07	8.06	8.05	8.04	8.02	8.01	8.00
26	7.99	7.97	7.96	7.95	7.94	7.92	7.91	7.90	7.89	7.88
27	7.86	7.85	7.84	7.83	7.82	7.81	7.79	7.78	7.77	7.76
28	7.75	7.74	7.72	7.71	7.70	7.69	7.68	7.67	7.66	7.65
29	7.64	7.62	7.61	7.60	7.59	7.58	7.57	7.56	7.55	7.54
30	7.53	7.52	7.51	7.50	7.48	7.47	7.46	7.45	7.44	7.43
31	7.42	7.41	7.40	7.39	7.38	7.37	7.36	7.35	7.34	7.33
32	7.32	7.31	7.30	7.29	7.28	7.27	7.26	7.25	7.24	7.23
33	7.22	7.21	7.20	7.20	7.19	7.18	7.17	7.16	7.15	7.14
34	7.13	7.12	7.11	7.10	7.09	7.08	7.07	7.06	7.05	7.05
35	7.04	7.03	7.02	7.01	7.00	6.99	6.98	6.97	6.96	6.95
36	6.94	6.94	6.93	6.92	6.91	6.90	6.89	6.88	6.87	6.86
37	6.86	6.85	6.84	6.83	6.82	6.81	6.80	6.79	6.78	6.77
38	6.76	6.76	6.75	6.74	6.73	6.72	6.71	6.70	6.70	6.69
39	6.68	6.67	6.66	6.65	6.64	6.63	6.63	6.62	6.61	6.60
40	6.59	6.58	6.57	6.56	6.56	6.55	6.54	6.53	6.52	6.51

- e) Daten über den Umfang der biogenen Belüftung in der späteren Aufwärmstrecke, möglichst ermittelt durch Messungen. Als sicherer Hinweis auf eine biogene Belüftung des Gewässers sind meßbare Tag-Nacht-Schwankungen des Sauerstoffgehaltes anzusehen, soweit diese Schwankungen nicht durch diskontinuierliche Einleitungen zehrungsfähiger Abwässer verursacht werden.
- f) Daten über den Umfang der physikalischen Belüftung in der späteren Aufwärmstrecke. Soweit hier nicht Richtwerte aus der Literatur Verwendung finden, sollten Messungen entweder aus Zeiten außerhalb der Vegetationsperiode benutzt werden, oder aber es wird die physikalische Belüftungsrate B aus dem vollständigen Tagesgang der Sauerstoffkonzentration ermittelt, um den Anteil der biogenen Belüftung (O₂-Eintrag) bei der Beurteilung auszuschalten (Abb. 10).

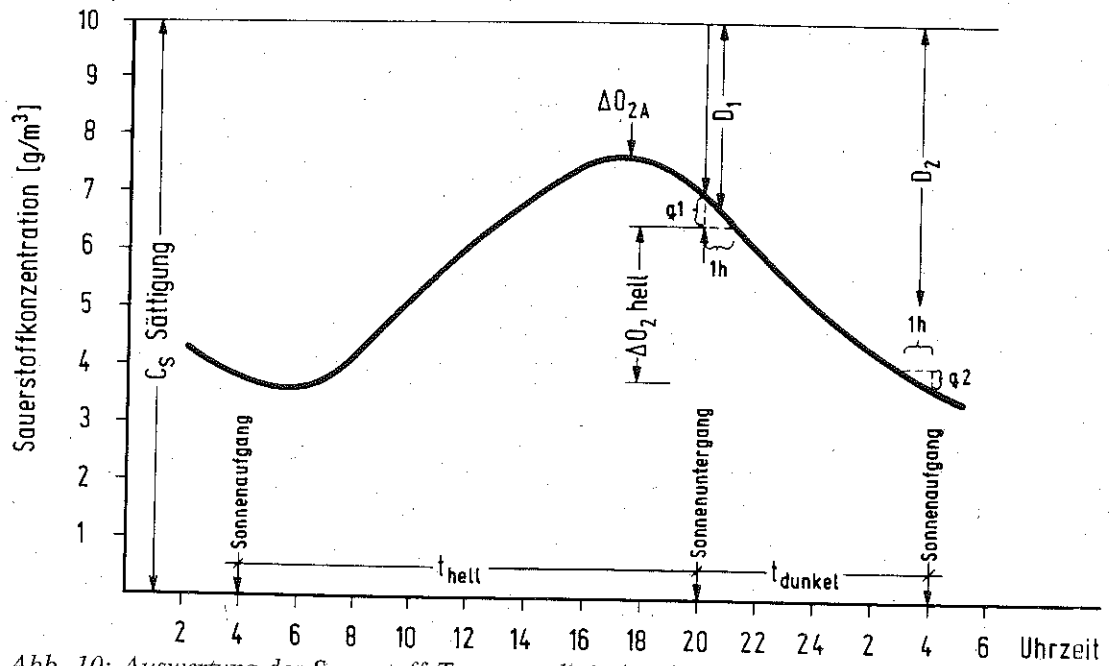


Abb. 10: Auswertung der Sauerstoff-Tagesganglinie (nach WOLF, 1971)

A. Berechnung der physikalischen Belüftungsrate B:

$$B = \frac{q_2 - q_1}{D_1 - D_2} \cdot C_s \quad (\text{g O}_2/\text{m}^3 \cdot \text{h})$$

B. Berechnung der Gesamtzehrungsrate Z:

$$Z = q_1 + \frac{B \cdot D_1}{C_s} \quad (\text{g O}_2/\text{m}^3 \cdot \text{h})$$

C. Berechnung der Sauerstoffproduktionsrate P:

$$P = \Delta \text{O}_{2 \text{ hell}} \left(1 + \frac{t_{\text{hell}}}{t_{\text{dunkel}}}\right) + \frac{4 \cdot \Delta \text{O}_{2A} \cdot t_{\text{dunkel}}}{t_{\text{hell}}} \quad (\text{g O}_2/\text{m}^3 \cdot \text{d})$$

Bei Seen (stehende Gewässer) ist außer den vorstehend genannten Untersuchungen noch die Kenntnis der jahreszeitlich wechselnden Schichtungen erforderlich. Jegliche Änderung eines physikalischen oder chemischen Faktors in einem See führt meist zu einer Veränderung der Biozönose. Die Wassertemperatur spielt dabei eine entscheidende Rolle. Es müssen daher bekannt sein:

- Seeoberfläche, Seetiefe, die Wasserstandsschwankungen, sowie evtl. Zu- und Abflüsse und daraus resultierende Strömungen, Trinkwasserentnahmen,
- der jahreszeitliche Gang der Temperatur- und Dichteschichtung in Abhängigkeit von den örtlich spezifischen klimatischen Verhältnissen,
- der Sauerstoffhaushalt und die Nährstoffbilanz in den verschiedenen Schichten (Epilimnion = Oberflächenschicht, Wasserschicht oberhalb der Sprungschicht; Metalimnion = Sprungschicht; Hypolimnion = Tiefenschicht unterhalb der Sprungschicht) und der Nährstofftrans-

port während der Herbst- und Frühjahrszirkulation (Umwälzung) sowie die Nährstoffzufuhr durch Zuflüsse oder Einleitungen,

- d) die Produktion eines Sees an organischen Stoffen sowie die Belichtungsverhältnisse,
- e) ferner besondere Faktoren, z. B. starke Sauerstoffzehrung in der Tiefe, Fäulnis und Auftreten von giftigen Fäulnisprodukten.

2.2 Veränderungen des Sauerstoffgehaltes im Kraftwerk als Folge der Behandlung des Kühlwassers im Werk

Der Sättigungswert von Sauerstoff in Wasser ist von Temperatur und Luftdruck abhängig. Da das Kühlwasser im Kraftwerk nicht nur erwärmt, sondern auch einem Unterdruck ausgesetzt wird, ist gedanklich eine Abnahme des Sauerstoffgehaltes nicht auszuschließen.

Wie die Erfahrungen an mehreren Stellen gezeigt haben, tritt normalerweise ein solcher Sauerstoffverlust innerhalb des Betriebes nicht ein. Diese Tatsache wird darauf zurückgeführt, daß

1. das zulaufende Wasser im allgemeinen nicht voll mit Sauerstoff gesättigt ist,
2. die Durchlaufzeiten im Unterdruckbereich für eine Entgasung nicht ausreichen und
3. das Wasser im Unterdruckbereich in einer geschlossenen Rohrleitung geführt wird.

In einer Vielzahl von Fällen wird das Kühlwasser im Kraftwerk durch entsprechende Gestaltung der Kraftschlußanlagen und der Kühlwasserkanäle mit Sauerstoff angereichert, möglichst bis zur Sauerstoffsättigung. Auch kann beim Betrieb von Ablaufkühltürmen der Sauerstoffgehalt bis an die Sättigungsgrenze angereichert oder bei vorheriger Übersättigung bis an die Sättigungsgrenze entgast werden.

Die positive Wirkung einer Sauerstoffanreicherung im Kühlwasser wird um so deutlicher erkennbar, je niedriger der relative Sauerstoffgehalt im zufließenden Wasser ist.

2.3 Veränderung der Sauerstoffverhältnisse durch die Aufwärmung

2.3.1 Sauerstofflängsprofil in Fließgewässern

Durch Aufwärmung wird der Sauerstoffhaushalt von der Einleitungsstelle flußabwärts grundsätzlich in 3-facher Weise verändert:

- a) Erwärmung erniedrigt den Sauerstoff-Sättigungswert; da vom Sauerstoffdefizit die Rate der physikalischen Belüftung abhängt, nimmt auch diese je nach Aufwärmung ab. Bei vorheriger Sauerstoff-Übersättigung im Gewässer wird die physikalische Entgasung (Sauerstoffverluste) verstärkt. Wird durch Aufwärmung der Sättigungswert überschritten, so kommt es zu vorher nicht vorhandenen physikalischen Sauerstoffverlusten.
Eine hohe Sauerstoffübersättigung im Gewässer ist die Folge einer starken Aktivität vor allem des Phytoplanktons. Entsprechend einer hohen biogenen Belüftung bei Belichtung ist die Sauerstoffzehrung während der Dunkelphase erheblich.

Bei organisch verunreinigtem Vorfluter, bei dem der natürliche Sauerstoffgehalt weit unter-

halb der Sättigungswerte liegt, ist der mit einer Temperaturerhöhung einhergehende Rückgang der Sauerstoffsättigungswerte insofern von Bedeutung, als das Sauerstoffdefizit – einer der Parameter der Wiederbelüftungsrate – geringer wird.

- b) Erwärmung erhöht andererseits die Geschwindigkeit der Sauerstoffaufnahme durch Vergrößerung des Diffusionskoeffizienten. Einflüsse nach a) und b) können durch einen weiteren Effekt überlagert werden.
- c) Erwärmung des Flußwassers beschleunigt den mikrobiellen Abbau organischer Substanzen im Gewässer und damit den Sauerstoffverbrauch je Zeiteinheit bei der Selbstreinigung.

Hierdurch können die im Sauerstofflängsprofil erkennbaren Sauerstoffminima im Bereich der Aufwärmstrecken nach flußaufwärts verlagert und vertieft werden. Diesem Nachteil steht der Vorteil rascherer Selbstreinigung mit rascherer Erholung des Sauerstoffhaushaltes dann gegenüber, wenn durch entsprechende Maßnahmen Unterschreitungen bestimmter Sauerstoffminimalwerte im Gewässer vermieden werden.

In der 1. Auflage wurde noch bei der seinerzeitigen Beschaffenheit des Rheinwassers von einer mittleren Steigerungsrate des BSB₁ von 16 %/K bei Koblenz berichtet. Spätere Untersuchungen ergaben folgende Werte:

Rhein	(Biblis)	6,6 %/K progressiv	Schulze-Rettmer, Böhnke
Rhein	(Köln)	12,4 %/K progressiv	Schulze-Rettmer, Böhnke
Rhein	(Koblenz)	8–9 %/K linear	
Weser		7–8 %/K linear	
Main	(oberh. Hanau)	7,5 %/K linear	

Hieraus ist ersichtlich, daß nicht mit einem einzigen Temperaturkoeffizienten für alle Flüsse und Flußabschnitte gerechnet werden kann. Auch die Gewässertemperaturen selbst haben neben anderen Bedingungen einen großen Einfluß auf die Höhe des Temperaturkoeffizienten.

Der Abbau der allochthonen, der von außen eingetragenen, meist zivilisationsbedingten und der eigenen = autochthonen, organischen Belastung erfolgt in gleicher Weise. Eine Trennung der Abbauvorgänge ist kaum möglich. Zur Beurteilung der Auswirkungen dieser Vorgänge auf die Gewässer müssen zudem hydrologische und morphologische Kriterien herangezogen werden, insbesondere die Fließgeschwindigkeit, die Rauigkeit des Untergrundes und die mittlere Tiefe.

Es ist bekannt, daß die Phytoplanktonproduktion in einem rasch fließenden Gewässer gegenüber einem langsam fließenden äußerst gering ist. Auch der Sauerstoffeintrag durch die Photosynthese des vorhandenen Phytoplanktons ist bei einem rasch fließenden Gewässer unbedeutend im Vergleich zur physikalischen Wiederbelüftung über die Wasseroberfläche.

In langsam fließenden Gewässern können sich Phytoplanktonpopulationen in Abhängigkeit vom Licht, vom Trophiegrad und von der Temperatur massenhaft entfalten. Die Folge sind starke Tag-/Nachtschwankungen des O₂-Gehaltes. Bei der Massenentwicklung des Phytoplanktons stehen die einzelnen Algen in Lichtkonkurrenz zueinander. Tiefer liegende Wasserschichten erhalten weniger Lichtenergie. In diesen Bereichen können die Dissimilationsvorgänge die Assimilationsvorgänge übertreffen.

Bei einer Wasserblüte ist neben Respiration der heterotrophen Organismen auch die Atmung der Algen selbst während der Nachtstunden von Bedeutung. Dies und der im kurzgeschlossenen

Kreislauf ständige oxidative Abbau abgestorbener Algenzellen durch heterotrophe Mikroorganismen belasten den Sauerstoffhaushalt bis hin zu kritischen Grenzkonzentrationen.

Unter den sauerstoffverbrauchenden Prozessen kommt der Nitrifikation eine besondere Bedeutung zu. Normalerweise folgt die N-Oxidation der C-Oxidation zeitlich nach. In einem Vorfluter liegen aber beim Vorhandensein von Einleitungen mit unterschiedlich vorgereinigtem Abwasser sowie durch die verschieden langen Abbauprozesse im Gewässer selbst, beide Prozesse nebeneinander vor. Die Nitrifikation ist stark temperaturabhängig; wenn sie nicht unterdrückt wird, geht sie in den BSB ein und kann diesen in seiner Aussage hinsichtlich des Umfangs vorhandener zehrfähiger organischer Last verfälschen.

Bei niedrigen Sauerstoffspannungen können spezielle Bakteriengruppen auftreten (Denitrifikanten, Desulfurikanten), die ihren Sauerstoffbedarf nicht aus dem physikalisch gelösten Sauerstoff, sondern aus anorganischen Verbindungen (NO_3^- , SO_4^{2-}) decken.

Das Ineinandergreifen der verschiedenen Reaktionsverläufe, von denen nur einige genannt werden können, ist so komplex, daß deutende Aussagen sich nur schwer ermöglichen lassen.

Unzweifelhaft ist, daß die biogenen Prozesse in einem Gewässer temperaturabhängig sind und bis zu einem Maximalwert beschleunigt werden. Eine weitere Temperaturerhöhung wirkt hemmend, und die Prozesse verlaufen langsamer.

Die Komplexität der Bioreaktionen und die Vielzahl der daran beteiligten Organismengruppen läßt es nicht angezeigt erscheinen, den für ein Gewässer festgestellten Temperaturgradienten pauschal auf jedes andere Gewässer zu übertragen; er mag zwar der Größenordnung nach als Bezugswert dienen, man muß aber an dem Grundsatz der „Individualität“ eines jeden Gewässers festhalten und jeweils standortbezogene Beurteilungskriterien schaffen, da diese im Bewertungsfalle wirklichkeitsnäher sind.

2.3.2 Seen

Bei Seen (stehende Gewässer) bewirkt die Zufuhr von größeren Wärmemengen im Sommer Beschleunigung des Stoffumsatzes und gegebenenfalls auch eine Veränderung der Schichtung (örtliche Zirkulation), wodurch nährstoffreicheres Tiefenwasser an die Oberfläche gebracht werden kann, was eine vermehrte Produktion zur Folge hat, sofern die Belichtungsverhältnisse es zulassen. Abbauvorgänge können bis zum völligen Sauerstoffschwund in größeren Tiefen führen. Die Tiefenzone wird schließlich mit den abgesunkenen organischen Stoffen als Schlamm zusätzlich belastet.

Die geringsten Nachteile für den See bietet in der Regel die Entnahme im oberen Hypolimnion (Tiefenzone) mit Rückgabe in die unmittelbar darüber liegende Schicht.

2.4 Verbesserung des Sauerstoffhaushaltes im Vorfluter

2.4.1 Allgemeines

Messungen an in Betrieb befindlichen Kraftwerken haben den Erfolg von künstlichem Sauerstoffeintrag in Oberflächengewässer bestätigt. Bei Abschätzungen der Gewässergüte unterhalb von Wärmeeinleitungen müssen Temperatur und Sauerstoffhaushalt des Gewässers nebenein-

ander betrachtet werden. Die infolge Gewässeraufwärmung für den Sauerstoffhaushalt entstehenden Nachteile können durch entsprechenden Sauerstoffeintrag meist ausgeglichen werden.

2.4.2 Maßnahmen zur Verbesserung des Sauerstoffhaushaltes

Der Sauerstoffhaushalt eines Gewässers kann bei bestehendem Defizit künstlich verbessert werden, indem Luft zugeführt wird

1. dem Kühlwasser im Werk
2. dem Gewässer

Zu 1) Bis zur Sättigung belüftet wird das Kühlwasser in (Naß-) Kühltürmen. Allerdings sind Kühltürme meist nicht ständig in Betrieb. In den Kühlwasserleitungen zwischen Kondensator und der Rückleitung ins Gewässer läßt sich das Wasser belüften

- a) durch geeignete Gestaltung des Überfalls am Kraftschlußbecken,
- b) durch Abstürze im Kühlwasser-Ablaufkanal,
- c) mittels Turbinenbelüftung, wenn im Ablaufkanal eine Turbine zur Ausnutzung einer Höhenstufe eingebaut ist,
- d) durch Düsenrohre u. ä. in offenen Ablaufkanälen.

Bei Überfall ist darauf zu achten, daß die Überfallkante möglichst lang ist und der Strahl frei in ein möglichst tiefes Becken hinabfällt oder in ein möglichst tief geführtes geschlossenes Kanalprofil hineingeführt wird.

Zu 2) Flußwasser kann zweckmäßig an einer Staustufe belüftet werden, und zwar

- a) am Wehr durch Überfall auf möglichst großer Länge,
- b) im Kraftwerk durch Turbinenbelüftung,
- c) in der Stauhaltung durch Lufteintragung über Düsenrohre oder Kreiselbelüfter.

3. Biologischer Zustand

3.1 Allgemeines

Die Lebensbedürfnisse eines Organismus beruhen auf seiner morphologisch-physiologischen Eigenart. Diese ist entstanden entweder im Zusammenhang mit der Sondergestaltung der Stätte, an der der Organismus lebt (Lebensstätte = Biotop), oder aus anderen Gründen, entspricht aber auch dann der Eigenart des von ihm bewohnten Biotops („Ausnutzungsprinzip“). Jede Organismenart stellt besondere Ansprüche an ihre Umwelt. Der Spielraum der Umweltbedingungen, innerhalb dessen ein Organismus lebensfähig ist, ist seine Reaktionsbreite oder ökologische Valenz. Die Existenz eines Organismus in einem Biotop setzt stets einen großen Komplex von Faktoren voraus, die jeweils die Entfaltung eines Organismus an seiner Lebensstätte bestimmen. Das „Wirkungsgesetz der Umweltfaktoren“ besagt: „Diejenigen der notwendigen Umweltfaktoren bestimmen die Entwicklung eines Organismus in einem Biotop (von Null bis zur Maximalentfaltung), die dem Entwicklungsstadium des Organismus, das die kleinste ökologische Valenz besitzt, in der am meisten vom Optimum abweichenden Qualität oder Intensität zur Verfügung stehen“.

An jeder Lebensstätte sind nicht nur Einzelindividuen einer Art, sondern stets Gemeinschaften verschiedener Organismenarten vorhanden, wie sich das Leben überhaupt nur in Gemeinschaften der verschiedenartigsten Organismen abspielt, eine Erkenntnis der biologischen Gemeinschaftslehre, der Biozönotik. Die Gemeinschaft der Organismen eines bestimmten Biotops ist eine Lebensgemeinschaft oder Biozönose, eine Vergesellschaftung von Organismen im gleichen Raum, bei der die Einzelglieder der Gesellschaft bestimmte, lebensnotwendige Beziehungen zueinander zeigen.

Die biozönotischen Faktoren stellen das Band dar, das die Glieder einer Biozönose aneinander knüpft, durch das sie sich gegenseitig bedingen. Solange die äußeren Lebensbedingungen nicht grundlegend verändert werden, bleiben Auswahl und Anzahl der Organismen durch Fortpflanzung in dem betreffenden Biotop dauernd erhalten. Die Konstanz des Gefüges einer Lebensgemeinschaft in qualitativer und quantitativer Hinsicht wird als „biozönotisches Gleichgewicht“ bezeichnet.

Der Mensch als geistiges Wesen greift allenthalben in das Gefüge und Getriebe der Lebensgemeinschaften ein und schafft so Verhältnisse, die dem Biotop ursprünglich fremd sind, heute aber das Naturgeschehen als „Überorganischer Faktor“ weitgehend beeinflussen; dieses Eingreifen muß nicht zerstörend sein, was in der äußerst flexiblen Natur auch kaum möglich wäre. So gibt es auch infolge von Wärmeeinleitungen, soweit die Temperatur nicht zu einer Eiweißdenaturierung führt (erst bei über 60 °C), keine absolut toten Gewässer, das Leben vollzieht sich statt dessen in einer den neuen Verhältnissen angepaßten Lebensgemeinschaft entsprechend dem Wirkungsgesetz der Umweltfaktoren. Dieses oben zitierte Gesetz definiert, welcher Faktor aus dem Gesamtkomplex der wirksamen Faktoren im konkreten Einzelfall der quantitativen Entfaltung eines Organismus an einen Biotop bestimmt. Es gibt Biotope optimaler Lebensentwicklung, in denen sich eine artenreiche Lebensgemeinschaft entfalten kann. Hier sind die Lebensbedingungen ausgeglichen; da kein Übermaß nach irgendeiner Seite hin vorliegt, finden viele Organismenarten Lebensmöglichkeiten. Beginnt aber ein lebensnotwendiger Faktor in geringer Stärke oder Menge aufzutreten (z. B. der Sauerstoff) oder gewinnt ein anderer eine zunehmend extreme Entwicklung (z. B. Strömung, Temperatur), dann nimmt die Artenzahl der Biozönose immer mehr ab, und schließlich bleiben nur wenige Arten übrig. Diese können sich dann aber zu hohen Individuenzahlen entwickeln und zugleich einen besonders ausgeprägten, einheitlichen Charakter zeigen. Man spricht vom „Ökologischen Gleichgewicht“ als dem

Gleichgewicht zwischen den Umweltfaktoren und der Organismenbesiedlung. Grundvoraussetzung zur Erhaltung dieses, wie auch immer gearteten Gleichgewichts ist die Eigenschaftsstetigkeit der Umweltfaktoren (sogenannte Eustasie). Inkonstanz bezüglich des Einflusses der Umweltfaktoren (Astasie) wirkt dagegen lebensfeindlich, weil sie der Anpassung von Organismen, wie sie sich auch unter Extrembedingungen vollzieht, entgegensteht.

Unzweifelhaft ist die Temperatur ein wesentlicher Umweltfaktor. So weiß man, daß die Wassertiere als wechselwarme Organismen sich der Temperatur ihres umgebenden Milieus anpassen und in ihren Lebensäußerungen davon abhängig sind, bei den Fischen beispielsweise bei tiefen Temperaturen Kältestarre einsetzt und andere niedere Wasserorganismen kritische Zeiten durch Bildung von Dauerstadien überbrücken. Trotzdem gibt es aber eine Fülle von anderen Organismen, deren Lebensfunktionen in der Kälte nur gemindert aber nicht eingestellt werden, gleiches gilt auch bei Gewässererwärmungen. Vorstehend dargestellte Erkenntnisse wurden bereits schon vor Jahrzehnten von Forbes, Lauterborn, Thienemann, Demoll und vielen anderen Forschern deutlich gemacht.

3.2 Fische

Jede einzelne Tierart – Kleintier oder Fisch – bevorzugt einen bestimmten Temperaturbereich. Zwischen seinen Grenzen (Maximum – Minimum) hat jede Tierart, insbesondere jede Fischart ein Optimum. Für die einzelnen Lebensvorgänge der Fische, wie Nahrungsaufnahme und deren Verwertung, Wachstum in den verschiedenen Lebensabschnitten, Wanderung zu den Laichplätzen, Fortpflanzung, Brutentwicklung und Winterruhe, ist der Temperaturbereich verschieden. Forellen und forellenartige Fische (Salmoniden) benötigen kaltes Wasser, während karpfenartige Fische (Cypriniden) wärmeres Wasser bevorzugen. Als tragbarer sommerlicher Höchstwert sollte für Salmoniden 20 °C nur kurzfristig erreicht werden, während in Cyprinidengewässern 25–26 °C von den hier lebenden Fischarten bei gutem Sauerstoffangebot auch über längere Zeiträume ohne Schaden ertragen werden.

Aufgrund der Verschiedenartigkeit der physikalischen und chemischen Verhältnisse, wobei besonders Temperaturen, Sauerstoffgehalt und Strömungsgeschwindigkeit zu betrachten sind, haben sich in den einzelnen Fließgewässern typische Fisch- und Tiergesellschaften entwickelt. Aus diesem Grunde unterscheidet man einzelne Fischregionen, die durch besondere Leitfische charakterisiert und nach diesen benannt sind.

Im allgemeinen schließen sich diese Regionen dem Flußlauf folgend aneinander an. Ein Gewässer braucht allerdings nicht alle Regionen aufzuweisen, auch nicht in der nachstehend aufgeführten Folge.

a) Forellenregion

Die Forellenregion mit ihrem Leitfisch, der Bachforelle, hat auch im Sommer kühles und sauerstoffreiches Wasser. Die Schwankung der Wassertemperatur beträgt im Laufe des Jahres nicht mehr als 12 °C.

Neben der Bachforelle sind in der Forellenregion nur wenige andere Fische beheimatet, es sind dies: die Koppe, die Bartgrundel, die Elritze und häufig auch der Aal.

b) Äschenregion

An die Forellenregion schließt sich die nach dem Leitfisch, Äsche, genannte Äschenregion an. Hier hat die starke Strömung der Forellenregion etwas nachgelassen, das Wasser ist tiefer

geworden, ist aber noch kalt und sauerstoffreich. Neben der Äsche finden sich Fische der Forellenregion, sowie häufig der Döbel, gelegentlich auch die Quappe. Früher war die Äschenregion das Laichgebiet des jetzt in westdeutschen Gewässern fast ausgestorbenen Lachses.

Forellen- und Äschenregion werden häufig zur Salmonidenregion zusammengefaßt. Eine Umstellung auf karpfenartige wertvolle Fischarten ist nicht möglich, da die Gegebenheiten (z. B. Strömung, Wassertiefe) diesen Fischen nicht den geeigneten Lebensraum bieten.

c) Barben- oder Nasenregion

In der nun anschließenden sich manchmal über hunderte von Kilometern erstreckenden Barben- oder Nasenregion verlangsamt sich die Strömung weiter, das Wasser wird wärmer, enthält aber noch reichlich Sauerstoff. Aus den Nebengewässern wird reichlich kühles und sauerstoffreiches Wasser zugeführt, da diese Nebengewässer in der Mehrzahl der Fälle der Salmonidenregion angehören.

Die Anzahl der Fischarten wird größer, da die Umweltverhältnisse nicht mehr so extrem sind.

Leitfisch dieser Region ist in Nord- und Westdeutschland die Barbe, in Süddeutschland die Nase. Neben den vorgenannten Fischen sind als wichtigste zu nennen: Der Döbel, der Hasel, das Rotauge, der Gründling, der Aal, der Hecht, der Barsch und das Flußneunauge.

d) Brassenregion (Bleiregion)

In der Brassenregion findet sich sauerstoffreiches Wasser an der Oberfläche, sauerstoffärmeres in der Tiefe. Neben dem Brassen als Leitfisch finden sich hier die meisten Fischarten, im besonderen Maße neben dem Karpfen und der Schleie viele andere karpfenartige Fische, auch als Weißfische bezeichnet. Besonders wertvoll sind Hechte, Zander, Aal und Barsch. Es fehlen die anspruchsvollen Formen aus den zuvor genannten Regionen.

e) Brackwasserregion

Die Brackwasserregion ist nicht nach einem Leitfisch benannt, sondern nach dem Mischbereich von Süß- und Meerwasser im Mündungsgebiet der Tideflüsse.

Hauptfischarten dieser Region sind Brassen und andere Weißfische, daneben Stint, Zander und Aal, dazu kommen in Küstennähe die Plattfische.

Durch das Klima bedingt, d. h. durch den Wechsel zwischen kalten Wintern mit niederen Wassertemperaturen und warmen bis heißen Sommern mit höheren Wassertemperaturen, hat sich der Lebenszyklus der Fischarten gestaltet. Laichzeiten, Wachstumszeiten und Ruhezeiten richten sich nach den Wassertemperaturen, die im unbeeinflussten Zustand im Durchschnitt der Jahre die gleichen Bewegungen machen.

Unter den Fischen unterscheiden wir Winterlaicher, Frühjahrslaicher und Sommerlaicher. Zu den Winterlaichern gehören die forellenartigen. Die Entwicklung ihrer Eier dauert je nach Wassertemperatur Wochen bis Monate.

Zu den Frühjahrslaichern sind Regenbogenforelle und Hecht zu rechnen. Auch die Entwicklung der Eier dieser Fische nimmt ebenfalls eine erhebliche Zeitspanne in Anspruch.

Alle übrigen Fischarten können zu den Sommerlaichern gerechnet werden. Die Entwicklung der Eier der Sommerlaicher dauert im allgemeinen nur wenige Tage.

Für alle Fische gilt aber, daß sich die befruchteten Eier in höheren Temperaturen schneller entwickeln als bei niederen. In unbeeinflussten Gewässern sind die Fische so an das Temperatursgeschehen angepaßt, daß eine größtmögliche Anzahl von Jungfischen den Fischbestand auf einer normalen Höhe hält.

3.3 Sonstige Makroorganismen

Temperaturerhöhungen können zu verstärktem Auftreten von Süßwasserschwämmen, Muscheln, z. B. der Dreikantmuschel und Schnecken führen, sofern das Nahrungsangebot entsprechend reichlich ist. Wenn die Wassertemperatur während des Winters nicht mehr unter gewisse Minimalwerte absinkt, ist zu erwarten, daß die Weiterentwicklung dieser Organismen nicht mehr, wie es bei normalem Temperaturgang der Fall ist, unterbrochen wird, diese vielmehr ständig anhaltendes Wachstum zeigen werden.

3.4 Mikroorganismen

Entsprechend der Gesetzmäßigkeit, nach der mit steigenden Temperaturen der Ablauf der biochemischen Reaktionen wächst, können bei vielen Arten von Mikroorganismen Massenentfaltungen auftreten, sofern die übrigen Faktoren solche Entfaltungen möglich machen.

a) Verlagerung der Bioprozesse

Eine übermäßige Erwärmung des Wassers könnte bei Vorhandensein organischer Stoffe zum Überwiegen der heterotrophen gegenüber den autotrophen Prozessen führen. Die damit verbundene Verminderung der biogenen Sauerstoffzufuhr und die Beschleunigung und Verstärkung der sauerstoffverbrauchenden Abbauprozesse kann in Gewässern, die durch organische Stoffe belastet sind, wiederum eine erhöhte Produktion heterotropher Organismen zur Folge haben. Daneben muß mit dem verstärkten Abläufen chemoautotropher Prozesse gerechnet werden.

b) Änderung der Planktonpopulation

In eutrophen Gewässern kann schon eine natürliche Erwärmung zu einer Verschiebung der heute überwiegend vorhandenen Kieselalgenpopulation zu Grün- und Blaualgenpopulationen führen. Das Temperaturoptimum der Kieselalgen liegt im allgemeinen unter 25 °C. Oberhalb 25 °C sterben sie größtenteils ab und werden durch Grün- und Blaualgen ersetzt, deren Optimum bei 28 bis 30 °C und auch darüber liegt. Die beobachteten Massenentfaltungen dürfen jedoch nicht ausschließlich unter dem Aspekt der Gewässererwärmung gewertet werden, denn eine solche Entfaltung ist eng an ein Angebot von Düngestoffen geknüpft. Derartige Massenentwicklungen von Planktonalgen werden bevorzugt in stehenden und langsam fließenden Gewässern aber auch in den Rohwasserspeichern der Flußwasserwerke gefunden, während in mehr oder weniger rasch fließenden Gewässern überwiegend in den Uferbereichen Massenentfaltungen weitgehend sessiler Formen zu beobachten sind. Blau- und Grünalgen geben bei massenhaftem Auftreten merkbar Geruchs- und Geschmacksstoffe, sowie giftige Stoffwechselprodukte (Phytotoxine) in das Wasser ab.

c) Verstärktes Auftreten von Actinomyceten (Strahlenpilze)

Im Zuge des Abbaus von Algen, besonders von Blaualgen bei ausreichendem Nahrungsangebot, kann es zu verstärktem Auftreten von Actinomyceten kommen, die zwar auch unter Normalbedingungen in den Fließgewässern vorhanden sind, deren Entwicklung jedoch bei erhöhter Temperatur wesentlich gefördert wird. Ihr Entwicklungsoptimum liegt im Tempe-

raturbereich von 28 bis 33 °C. Auch von diesen Organismen ist bekannt, daß sie toxische Stoffwechselprodukte ausscheiden.

d) Verstärkte Auswirkungen in stehenden und gestauten Gewässern

Die durch Eutrophierung und Erwärmung bedingten Massenentfaltungen führen mit dem Absterben der Algen und deren Absinken auf den Gewässergrund zu einem Sauerstoffschwund in den tieferen Schichten durch die vermehrt einsetzenden Abbauvorgänge stellenweise mit Schwefelwasserstoff- und Methangasbildung.

e) Vermehrung pathogener Keime

Die Lebensdauer und eventuelle Vermehrung der meisten pathogenen Keime werden durch höhere Temperaturen im Gewässer herabgesetzt, auch wenn ihr Entwicklungsmaximum bei 36 bis 40 °C liegt. Treffen jedoch mehrere unerwünschte Faktoren wie Anaerobie, hohe organische Belastung mit erhöhten Wassertemperaturen zusammen, kann die Entwicklung z. B. von Clostridien, von denen einige Arten hochwirksame Exotoxine ausscheiden, begünstigt werden.

4. Chemischer Zustand

Bei der Erwärmung von Gewässern – sei sie künstlicher oder auch natürlicher Ursache – kann der chemische Zustand des betreffenden Gewässers in verschiedener Weise beeinflusst werden. Die einzelnen Faktoren, die berücksichtigt werden müssen, werden im folgenden getrennt abgehandelt, obwohl teilweise eine gegenseitige Beeinflussung bzw. Überschneidung vorliegt. Genaue Zahlenangaben können hier im einzelnen nicht immer gebracht werden, da die Verhältnisse in den Gewässern stark differieren und sich häufig entweder nur experimentell bestimmen oder nur abschätzen lassen.

4.1 Sauerstoffhaushalt (vgl. Kap. II 2.2)

Durch Temperaturerhöhungen kann der Sauerstoffgehalt neben den sich aus den Gasgesetzen ergebenden Ursachen erniedrigt werden durch

- a) Beschleunigung der chemischen und biochemischen Reaktionen
- b) Erhöhung der Planktondichte (nächtliche Dissimilation)
- c) Verringerung der biogenen Belüftung.

Erwärmungen können sich bei einigen Fließgewässern, besonders bei Niedrigwasserführung, wenn diese in die Herbstmonate fällt, nachteilig auswirken. Unter normalen Gegebenheiten reichert sich das Flußwasser in diesem Zeitraum durch das bei fallenden Wassertemperaturen zunehmende Sauerstoffeintragevermögen und durch Verminderung der Abbauprozesse zunehmend mit Sauerstoff an. Als Folge einer thermischen Belastung werden diese Verhältnisse jedoch verändert. Die dann zu erwartenden erhöhten Konzentrationen an organischen Substanzen werden während dieses Zeitraumes einen erhöhten Sauerstoffbedarf aufweisen und die sauerstoffverbrauchenden Prozesse intensivieren. Daher kann in stark verschmutzten Gewässern, bei Niedrigwasserführung im Falle zusätzlicher thermischer Belastung, mit einer Erhöhung des Sauerstoffdefizits gerechnet werden.

Um den Normalzustand des Sauerstoffhaushaltes annähernd wieder herzustellen, bedarf es in einem erwärmten und belasteten Gewässer einer Belüftung, die ausreicht, sowohl den erhöhten biochemischen Sauerstoffbedarf zu decken, als auch den durch thermische Schädigung von Phytoplankton hervorgerufenen Verlust an photosynthetisch gebildetem („biogenem“) Sauerstoff voll auszugleichen.

4.2 Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht

4.2.1 Löslichkeit des Kohlendioxids im Wasser

Durch Temperaturerhöhung wird die Löslichkeit des Kohlendioxids im Wasser vermindert. Setzt man die Löslichkeit bei 0 °C gleich 100 %, so sinkt sie auf 70 % bei 10 °C, 50 % bei 20 °C, 37 % bei 30 °C und 30 % bei 40 °C. Wenn der entsprechende Gehalt an freier zugehöriger Kohlensäure unterschritten wird, kann Kalziumkarbonat ausfallen. Dieser Effekt kann jedoch nur bei Wässern mit sehr hohen Karbonathärten eintreten.

4.2.2 Biogene Verschiebung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts

Durch Temperaturerhöhungen werden die autotrophen und heterotrophen Prozesse im Gewäs-

ser beschleunigt, wobei Kohlendioxid einerseits verbraucht, andererseits produziert wird. Diese Vorgänge können von Einfluß auf das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht sein (z. B. biogene Entkalkung).

4.3 Stickstoffhaushalt

4.3.1 Ammonium-Ammoniak-Gleichgewicht

Bei gleichem pH-Wert tritt eine Verschiebung des Ammonium-Ammoniak-Gleichgewichts ein, wenn die Temperatur steigt. Die Konzentration an freiem Ammoniak wird erhöht. Es ist bei einem Temperaturanstieg von 10 K auf 20 °C bei pH-Werten zwischen 8 und 9 mit einem Faktor von etwa 1,5 zu rechnen. Unter Umständen kann durch diesen Effekt die Toxizitätsgrenze an freiem Ammoniak erreicht werden.

4.3.2 Konzentration an Ammonium-Stickstoff

Durch Beschleunigung der Oxydations- und bzw. Reduktionsvorgänge infolge eines Temperaturanstieges kann eine Erhöhung oder Herabsetzung der Konzentration des Ammonium-Stickstoffes erfolgen, je nachdem, welche anderen äußeren Bedingungen vorliegen. Bei der Reduktion von Nitrit und Nitrat wird allerdings meist nicht die Stufe des Ammonium erreicht, sondern es entsteht freier Stickstoff.

4.3.3 Konzentration an Nitrit- und Nitrat-Stickstoff

Auch hier kann – je nach den äußeren Umständen – eine Erhöhung bzw. Erniedrigung der Konzentrationen durch Beschleunigung von Oxydations- bzw. Reduktionsvorgängen eintreten. Es sei darauf hingewiesen, daß eine natürliche Nitrifikation naturbedingt vor allem im Sommer bei erhöhten Temperaturen auftritt. Bei künstlicher Erwärmung wird die Dauer der Nitrifikation verlängert.

4.4 Organische Stoffe

Bei erhöhten Temperaturen kann sich die Menge an organischem Kohlenstoff verringern, da durch beschleunigte Selbstreinigung die gelöste organische Substanz teilweise in ungelöste Stoffe und Kohlendioxid überführt wird. Andererseits kann sich der Gehalt an organischen Substanzen durch das zeitweilige Zusammenbrechen der Überproduktion heterotropher Organismen und durch die Beschleunigung chemoautotropher Prozesse erhöhen, weiterhin durch das mögliche Absterben des Planktons als Folge eines im Bereich der Kühlwassereinleitung plötzlich eintretenden Temperaturanstieges. Aber auch lebende Algen können unter besonderen Bedingungen gelöste organische Stoffwechselprodukte ausscheiden.

4.5 Geruchs- und Geschmacksstoffe

Solche Stoffe entstehen durch

- a) das Auftreten größerer Mengen von Actinomyceten und Algen im Wasser,

- b) das verstärkte Auftreten von Süßwassermuscheln und -schwämmen, die vor allem nach dem Absterben sehr intensive Geruchs- und Geschmacksstoffe freisetzen,
- c) den Eiweißabbau, wenn er bei völligem Sauerstoffmangel unter anaeroben Bedingungen abläuft.

Im Wasser enthaltene Geruchsstoffe machen sich bei erhöhter Temperatur verstärkt bemerkbar.

4.6 Erhöhte Konzentration an organischen und anorganischen Inhaltsstoffen

Die erhöhte Verdunstung des Wassers bewirkt eine Anreicherung der anorganischen und organischen Inhaltsstoffe. Folgerungen sind nur nach den jeweiligen Gegebenheiten des Falles möglich.

4.7 Beschleunigung der Lösevorgänge

Bei wesentlich erhöhten Temperaturen werden langsam ablaufende Lösevorgänge beschleunigt. Dies kann bei der Uferfiltration eine Rolle spielen.

4.8 Korrosion

Die Korrosion an Wasserbauwerkstoffen ist in erster Linie von der Wasserbeschaffenheit und auch vom Sauerstoffgehalt des Wassers abhängig. Eine Erhöhung der Wassertemperaturen führt zur Steigerung der Korrosionsrate. Sowohl ihre absolute Größe als auch ihre temperaturbedingte Steigerung ist für jeden Werkstoff eine andere.

5. Nebelbildung

Nebelbildung tritt immer dann auf, wenn der Taupunkt der Luft (Staub, Abgase usw) unterschritten wird. Bei der Aufwärmung eines Flusses durch Warmwassereinleitungen wird der Luft durch die dadurch bedingte erhöhte Verdunstung zusätzlicher Wasserdampf zugeführt. Dadurch ist eine Heraufsetzung des Taupunktes und damit eine verstärkte Nebelbildung verbunden. Auf der anderen Seite wird durch die Wärmeabgabe des Warmwassers an die Atmosphäre eine geringfügige Aufwärmung der Luft verursacht, die der Nebelbildung entgegenwirkt. Beobachtungen in der Natur, insbesondere bei Nebelbildung im Herbst, wenn die Wassertemperaturen über der Lufttemperatur liegen, zeigen jedoch, daß der Einfluß der Aufwärmung der Luft geringer anzusetzen ist, als die zusätzliche Wasserdampfung durch erhöhte Verdunstung.

Wenn die Temperatur des Wassers die der Luft um etwa 5 K überschreitet, kommt es normalerweise zu Flußrauchen ohne wesentliche Sichtbehinderung. Unter bestimmten meteorologischen Voraussetzungen, z. B. Inversionsbildung in geringer Höhe über der Wasseroberfläche, kann das Flußrauchen in Dampfnebel mit Sichtweitenrückgang unter 1000 m übergehen. Diese meteorologischen Voraussetzungen werden durch örtliche Klimafaktoren wie Landschaftsform, Bodenbedeckung, Besiedlung, aber auch durch Eigenschaften des Gewässers begünstigt oder behindert. Deshalb läßt sich keine allgemeingültige quantitative Angabe über die Auswirkung von Warmwassereinleitung auf die Nebelbildung machen.

6. Wasserverluste

Beim Übergang der Wärme an die Atmosphäre (Luft) ist die Verdunstung mehr oder weniger stark beteiligt. Die bei diesem Vorgang im Kühlturm entstehenden Wasserverluste sind in Abschnitt II. 2 genannt und ihre Abhängigkeit von den meteorologischen Bedingungen aus Abbildung 11 zu ersehen.

Auch für die Ermittlung des Verdunstungsanteiles nach einer Wärmeeinleitung in ein Gewässer ist die Kenntnis der meteorologischen Daten Voraussetzung. Allgemein kann man annehmen, daß die Verdunstungsverluste im Fluß bei etwa 50–70 % der Werte bei entsprechendem Kühlturbetrieb liegen. Sie verteilen sich über die Abkühlungsstrecke.

7. Auswirkungen auf Wasserbenutzer

7.1 Trink- und Betriebswassergewinnung

Über die Auswirkungen einer Erwärmung der Oberflächengewässer auf die Gewinnung von Trink- und Betriebswasser liegen nur wenige Erfahrungen vor. Dennoch lassen sich auf Grund zahlreicher Beobachtungen und Modellversuche über die Temperaturabhängigkeit der in den Gewässern und bei wassertechnologischen Prozessen ablaufenden physikalischen, chemischen, biochemischen und biologischen Vorgänge zumindest die Tendenzen der Auswirkung auf die Trinkwasserversorgung erkennen.

Solche Auswirkungen brauchen bei den hier in Betracht kommenden geringfügigen Gewässer-erwärmungen nicht nachteilig zu sein. Andererseits lassen sich für die Trinkwassergewinnung auch Vorteile ableiten, daß beispielsweise das Wasser in den Gewässern und Gewinnungsanlagen infolge seiner höheren Temperatur im Winter nicht mehr gefriert. Auch werden hydraulische Vorgänge durch die Veränderungen rein physikalischer Parameter, wie z. B. die Zähigkeit des Wassers bei einer Temperaturerhöhung, günstig beeinflusst.

Im allgemeinen werden Reaktionsabläufe entsprechend der van't Hoff'schen Regel verändert, nach der die Reaktionsgeschwindigkeit bei einer Temperaturerhöhung um 10 K auf das zwei- bis vierfache gesteigert wird. Dies gilt neben den chemischen Reaktionsabläufen, wie Oxidations- und Reduktionsreaktionen, auch für viele Lebensvorgänge, soweit sie sich innerhalb der Temperaturtoleranzgrenzen der entsprechenden Organismen bewegen.

Schwämme und Muscheln sind zur Aufrechterhaltung ihrer Lebensfunktionen auf die ständige Zufuhr nahrungsreicher Schwebstoffe angewiesen. Es versteht sich deshalb von selbst, daß in Entnahmebauwerken durch die sich zwangsläufig ergebende höhere Fließgeschwindigkeit des Wassers diesen Organismen mehr Nahrung geboten wird, ihre Vermehrungsrate steigt und deshalb nicht ausgeschlossen werden kann, daß sie bis in interne Betriebssysteme wandern. Wesentlich erscheint in diesem Zusammenhang die Feststellung, daß die Ausbreitung von Schwämmen und Muscheln in Wärmesystemen von Kraftwerken, gleiches gilt uneingeschränkt auch für die Entnahme von Oberflächenwässern ausschließlich zu Trink- und Betriebswasserzwecken, primär in keiner Weise in Zusammenhang mit Wärmeeinleitungen steht. Erst sekundär mag die Temperaturerhöhung für deren Entwicklung förderlich sein, jedoch nicht hindernd, was bedeutet, daß selbst die im Kondensator auftretenden Temperaturen, in Bestärkung der in Abschnitt 3 dargelegten Verhältnisse, keine letalen Folgen haben müssen, vielmehr erst durch letal wirkende Maßnahmen, diese die Funktionen eines Kühlsystems behindernden Faktoren entfernt werden können. So bleibt letztendlich nur die Feststellung, daß die vielfach genannten Gefahren der Trink- und Brauchwasserversorgung durch Schwämme und Muscheln in keinem unmittelbaren Zusammenhang mit gewichtigen Temperaturerhöhungen stehen, sondern ausschließlich die Folge eines entwicklungssträchtigen Nahrungsangebotes durch eine vorwiegend allochthone Schwebstoffzufuhr sind.

Organische, in Oberflächengewässern enthaltene Stoffe unterliegen auch bei einer Bodenpassage (Ufer- oder Sohlefiltration) einem biologischen Abbau, wobei die vielleicht primär bestehende aerobe Phase bei folgendem Sauerstoffmangel durch anaerobe Prozesse abgelöst wird, in deren Folge neben dem Verbleib der in diesem Milieu nicht mehr abbaubaren organischen Substanzen aus den Sedimenten zusätzlich zweiwertige Eisen- und Manganverbindungen in Lösung gehen, Vorgänge, die unzweifelhaft temperaturabhängig sind.

Die Wassertemperatur ist aber auch im Hinblick auf unerwünschte Inhaltsstoffe bedeutsam.

Zwar können bei höheren Temperaturen Sedimentationsvorgänge erleichtert, andererseits aber unerwünschte Lösungsvorgänge begünstigt werden. So können bei der Bodenpassage beim Durchströmen fluviatiler Ablagerungen störende oder sogar toxische Stoffe in verstärktem Maße gelöst und die Wasserqualität nachteilig verändert werden.

Durch das vorstehend angeführte Sauerstoffzehrungsvermögen organisch verunreinigter Wässer können bei einer Bodenpassage und bei natürlichen Temperaturen Nitrifikationsvorgänge unterdrückt werden, so daß Ammoniumionen und als Folge ungenügender Nitrifikation oder unvollkommener Denitrifikation auch Nitriten nachweisbar werden. In gleicher Weise können Sulfationen bis zum Schwefelwasserstoff reduziert werden, wobei durch Folgereaktionen auch elementarer Schwefel gebildet werden kann. Diese Gegebenheiten sind seit Jahrzehnten aus der allgemeinen Wasserwerkspraxis hinreichend bekannt, die hypothetisch angenommenen Steigerungsquoten, bedingt durch Temperaturerhöhungen in dem durch künstliche Temperaturerhöhungen zu erwartenden Temperaturbereich, liegen innerhalb der Grenzen der analytischen Nachweismethoden, so daß zwingend kein Schluß auf den temperaturbedingten Einfluß hinsichtlich der Lösevorgänge und der Folgen reduktiver Reaktionen möglich ist. Angesichts dieser Gegebenheiten erscheint es ratsam, keine voreiligen Schlüsse über die Unbedenklichkeit auch von geringfügigen Temperaturerhöhungen zu ziehen, solange sie in ihren Auswirkungen nicht beurteilbar und der Höhe nach nicht bekannt sind. Zur Klärung dieser Fragen sind eingehende Untersuchungen dringend geboten.

Selbst geringfügige Mengen an organischen Stoffen können noch reduktive Vorgänge in Rohrleitungen auslösen und Ursache von Korrosionserscheinungen sein, (Keimvermehrung durch anaerobe Mikroorganismen).

Ebenso kann in solchen Wässern, die mit Sauerstoff angereichert sind, eine Keimvermehrung durch aerobe Mikroorganismen (Wiederverkeimung) einerseits zu korrosiven Erscheinungen, andererseits zu Rohrquerschnittsverengungen durch Verkrustungen führen.

Die korrosiven Wirkungen können noch durch die Anwesenheit aggressiver Kohlensäure begünstigt werden, die je nach Organismenart zusätzlich in den von ihnen besiedelten Systemen erzeugt wird. Daraus erhellt, daß für die Entwicklung von Mikroorganismen in einem Wasserverteilungsnetz maßgeblich das Nahrungsangebot (= organische Substanz) der die Lebensbedingungen limitierende Faktor darstellt. Temperaturerhöhungen wirken hierbei beschleunigend.

Da Betriebswasser in der Mehrzahl der Fälle fast ausschließlich als Kühlwasser Verwendung findet, sind Gewerbe und Industrie auf eine möglichst niedere Temperatur solchen Betriebswassers angewiesen.

Bei der Betriebswasserversorgung für die Landwirtschaft zu Bewässerungs- oder Beregnungszwecken treten nachteilige Auswirkungen durch Aufwärmungen des Wassers nicht auf. Es sind vielmehr pflanzenphysiologisch (wachstumsphysiologisch) gewisse positive Auswirkungen durch die Verwendung wärmeren Wassers bei der Bewässerung oder Beregnung zu erwarten. Wo Grundwasser zu Bewässerungszwecken genutzt werden soll, ist eine Temperaturerhöhung durch Zumischung wärmeren Wassers sogar erwünscht.

7.2 Fischerei

Für das Leben der Fische im Gewässer sind drei Temperaturen von Bedeutung (vgl. Abschn. II, 3.1, 3.2)

1. die Grenztemperatur der Kältelethargie (bei deren Unterschreiten die Kältestarre eintritt),

2. die Vorzugstemperatur oder optimale Wachstumstemperatur (bei der die biologischen Vorgänge am intensivsten sind und die Fische daher am besten gedeihen),
3. die Letaltemperatur (bei der die Mehrzahl der Fische aus einem Kollektiv eine bestimmte Einwirkungszeit nicht überlebt).

Durch die Erhöhung der Wassertemperaturen wird der jahreszeitliche Lebenszyklus der Fische verändert. In extremen Fällen kommen die Fische zu keiner Winterruhe mehr, was abträgliche Auswirkungen hat, wenn im Winter keine ausreichenden Nahrungsmengen für den Stoffwechsel zur Verfügung stehen.

Darüber hinaus kann durch den Fortfall des normalen Lebenszyklus der Fische die Zeit der Laichreife verändert werden.

Unter Voraussetzung günstiger Wassertemperaturen für die Eientwicklung kann die ausschließende Fischbrut unter Umständen nicht die erforderliche Nahrung finden.

Die Erfahrungen haben jedoch gezeigt, daß diese negativen Einflüsse durch die positiven überlagert werden. In der Mehrzahl erwärmter Gewässer wächst die Ausbeute an Fischen nach Qualität und Quantität an. Das ist darauf zurückzuführen, daß die Fische länger in Zeiten mit besseren Lebensbedingungen und sogar im Bereich der Vorzugstemperaturen leben und gedeihen können.

Für die Letaltemperatur ist die vorangegangene Adaption maßgebend. Fische, die an höhere Temperaturen angepaßt sind, können die nachstehend angeführten Temperaturen ertragen:

Obere Temperatur-Toleranz einiger Fische (nach Elster)

Amerikanischer Bachsaibling	25,3 °C
Regenbogenforelle (Jungtier)	24,5 °C
Regenbogenforelle (Erwachsene)	28,3–29,5 °C
Junglachs (Parr)	32,5–33,8 °C
Bachforelle	22,5–29,0 °C
Schleie	29,0–30,0 °C
Hecht	25,0–29,0 °C
Flußbarsch	30,0–31,0 °C (33 °C)
Plötze	29,5–31,5 °C
Elritze	31,0 °C
Döbel	33,0–37,0 °C
Zwergwels	37,5 °C
Karpfen	37,5 °C
Tilapia mosambica (Tropenfisch)	36,0–37,0 °C (– 40 °C) 38,2 °C
Goldfisch	41,0 °C

Diese obere Grenze der Temperaturverträglichkeit liegt bei Fischen nicht in dem Bereich, in dem die Proteine denaturieren oder das Fermentsystem blockiert wird.

Aus den Werten der Tabelle könnte man folgern, daß für einige Fischarten Wassertemperaturen über 26 °C als kritisch zu bezeichnen sind und Temperaturen um oder über 30 °C über einen längeren Zeitraum – mit Ausnahme des Karpfens, der als Flußfisch nicht überall geeignet ist – nicht mehr ertragen werden. Verfolgt man jedoch die in den vergangenen Jahren erprobten Fischeinsätze in Kühlteichen und in den Tassen von Kühltürmen (s. Kap III, 4), so läßt sich verdeutlichen, daß in dem im Gewässer in Betracht kommenden Bereich bis 30 °C die Temperatur allein kein begrenzender Faktor für die Lebensfähigkeit der Fische darstellt.

Schädigungen treten erst durch eine zu große Störung des Sauerstoffhaushalts auf. Fischsterben finden – ausgesprochene Gifteinwirkungen ausgenommen – in der warmen Jahreszeit fast ausschließlich bei geringer Wasserführung in stark verunreinigten Fließgewässern oder polytrophen bis eutrophen stehenden Gewässern statt. Ursache solcher Fischsterben sind überwiegend oder fast ausschließlich Sauerstoffmangel, pH-Werterhöhungen u. a. durch biogene Entkarbonisierung, Freisetzen von Ammoniak, Aufsteigen von Schwefelwasserstoff (vor und bei Gewittern), die unter Einfluß höherer Temperatur verstärkt hervortreten. Im Ökosystem eines Gewässers sind folglich alle umweltrelevanten Faktoren zu werten.

Die der Fischernährung dienende Mikrofauna und -flora sowie die Kleintierlebewelt toleriert eine Temperaturerhöhung im allgemeinen besser als die Fische. Abgesehen von stenothermen Arten der kälteren Salmonidenregion werden alle übrigen Wasserorganismen Temperaturerhöhungen ertragen.

Als nachteilige Erscheinung kann sich allerdings bemerkbar machen, daß die besonders thermophilen Arten unter den Pflanzen und Tieren bei günstigen Nährstoffangeboten zu Massentwicklungen kommen und weniger thermophile Formen in ihrem Aufkommen unterdrücken können. So erreichen beispielsweise die Oscillatorien ihre Maxima bei hohen Wassertemperaturen. Die rasche Lebensfolge bei Wasserblüten bedingt erhöhten Sauerstoffverbrauch (Dissimilation), der aber nicht durch die erhöhte Sauerstoffproduktion (Assimilation) ausgeglichen werden kann.

Auch das durch die Temperaturerhöhung geförderte Wachstum submerser Pflanzen langsam fließender oder gestauter Gewässer wird dieses Sauerstoffdefizit nicht beseitigen können.

Soweit die Fischbestände unserer Gewässer betroffen sind, kann die Auffassung vertreten werden, daß Temperaturen von 18 °C bis 20 °C in Salmoniden- und 26 °C bis 28 °C in allen übrigen Gewässern ohne Schäden von den Fischen auch über einen längeren Zeitraum ertragen werden können.

7.3 Erholung und Fremdenverkehr

In einem Fließgewässer mit ausgeglichenem Sauerstoffhaushalt wird eine Wassererwärmung durch Kühlwassereinleitung kaum eine Nutzungs-Beeinträchtigung für Baden und Wassersport hervorrufen, es sei denn, die örtliche Aufwärmung wäre im Sommer so stark, daß der erhoffte Abkühlungseffekt im und auf dem Wasser nicht mehr eintritt. In stärker belasteten Gewässern kann jedoch durch die Wärmezufuhr eine Algen-Massenentwicklung und somit eine starke Trübung des Wassers und eine Verschleimung der Uferzone gefördert werden.

7.4 Schifffahrt

Durch Querströmungen an den Entnahme- und Rückleitungsstellen von Kühlwasser kann die Schifffahrt behindert werden. Durch entsprechende Gestaltung der Bauwerke läßt sich dies jedoch vermeiden.

Von Nachteil für die Schifffahrt ist die durch die Aufwärmung stellenweise bedingte Tendenz zu stärkerem Flußbrauchen und zur Nebelbildung. Bei Kühlwassereinleitung tritt eine Verminderung der Eisbildung ein, die sich für die Schifffahrt vorteilhaft auswirkt. Bei sehr niederen Wasserständen kann es durch zusätzlichen Wasserverlust bei Kühlturbetrieb an nicht gestauten Flüssen zu einer Verminderung der Tauchtiefe und damit zeitweise zu einer Verminderung der Transportmöglichkeiten kommen.

III. Kapitel

Kriterien bei der Beurteilung von Wärmeeinleitungen in Gewässer bei Anwendung von Kühlmaßnahmen

Die Erzeugung elektrischer Energie macht die Bereitstellung von Medien erforderlich, welche die bei der Energieproduktion nicht genutzten Energiemengen ohne Schaden für die Umwelt aufzunehmen vermögen. Als solche Medien stehen gegenwärtig nur Wasser und Luft zur Verfügung, und selbst dann, wenn es gelingen sollte, das Wasser als Kühlmittel durch andere Stoffe zu ersetzen, wird nach dem derzeitigen Erkenntnisstand wohl stets die Atmosphäre, wie bislang auch, letztlich die Abwärme aufnehmen müssen. Die derzeitigen Bestrebungen, durch Einsatz von Kühltürmen den Gewässern Restwärmemengen weitestgehend fernzuhalten, stellen lediglich eine Konzentrierung des Wärmeüberganges in die Atmosphäre an wenigen, aber definierbaren Standorten dar. Die sich daraus ergebenden möglichen klimatologischen Auswirkungen sind in der vorliegenden Ausarbeitung nicht zu betrachten, vielmehr sind die Kriterien zur Beurteilung von Wärmeeinleitungen in Gewässer bei Kühlturbetrieb zu beleuchten. Denn mit der bloßen Forderung, bei stromerzeugenden Anlagen Kühltürme zu erstellen, ist die für das Gewässer sich daraus ergebende Problematik nur zum Teil zu lösen.

1. Typen der Kühltürme und ihre Technik

1.1 Bauliches

Kühltürme haben die Aufgaben, die Abwärme vom Medium Wasser an das als „Wärmesenke“ dienende Medium Luft überzuführen. Dazu können Trockenkühltürme und Naßkühltürme ggf. in Kombination der beiden Verfahren angewandt werden. Da Trockenkühltürme keine Wärme in Gewässer abgeben, wird hier nur auf Naßkühltürme eingegangen. In ihnen wird der kühlende Luftstrom an dem verrieselten Wasser vorbeigeführt. Maßgebend für die Kühlwirkung sind die Stärke des Luftstromes, die Kontaktzeit und die Kontaktfläche zwischen Luft und Wasser. Vom System her ist zwischen Ventilator- und Naturzugkühltürmen zu unterscheiden.

In Ventilator-Kühltürmen wird der Luftstrom maschinell erzeugt. Die Großventilatoren erreichen bereits Durchmesser bis 30 m; zugehörige Kühltürme haben dann Durchmesser um 70 m. Die maximale hydraulische Belastung (Durchfluß) solcher Kühltürme liegt zur Zeit bei 100 000 m³/h je Kühlturm.

Die Vorteile von Ventilator-Kühltürmen (mechanischen Verdunstungskühltürmen) gegenüber Naturzug-Kühltürmen sind:

1. Genaue Steuerung der Kaltwassertemperatur
2. Niedrige Pumphöhen
3. Mehr Einbauten je Volumeneinheit des Kühlturms möglich
4. Bessere Anpassung und größere Kühlzone möglich
5. Geringe Grundstücksflächen
6. Kapitalkosten geringer als für Naturzugkühler (Der Vorteil der geringen Grundstücksfläche gilt nur, wenn mit einer Ventilatoreinheit gebaut werden kann, nicht jedoch, wenn mehrere Einheiten mit relativ großen Abständen gebaut werden müssen).

Die Nachteile sind folgende:

1. Hohe Betriebskosten
2. Hoher Unterhaltungsaufwand
3. Möglichkeit der Rückströmung der warmen, feuchten Abluft in die Lufteinlässe
4. Größere Auswirkungen auf das Klima der Umgebung
5. Schallemissionen

Ventilatorkühltürme können für einen breiten Bereich der Wärmebelastbarkeit benutzt werden, da sie für fast jede Kapazität konstruiert werden können. Maximale Ventilatorgrößen begrenzen die Kapazität einer Einheit, man kann jedoch zusätzliche Einheiten zu einer Gesamtanlage zusammenfassen, um den Gesamterfordernissen gerecht zu werden. Zellenkühler sind eine Reihe nebeneinandergestellter Ventilatorkühler kleinerer Einzelleistung.

Beim Naturzug-Kühler entsteht der Luftstrom aus dem Dichte- und Druckunterschied zwischen der Luft innen und außen. Die Schale übernimmt in diesem Falle die Funktion eines Kamines. Das oberhalb des Lufteintrittsspaltess verrieselte Wasser erwärmt die Luft und sättigt sie mit Wasserdampf, wobei Wärme übertragen wird. Beide Vorgänge vermindern die Dichte der Luft und veranlassen sie, in dem Turm aufzusteigen. Dadurch entsteht ein kontinuierlicher Luftstrom durch den Turm. Winde von außerhalb, die über die obere Öffnung des Turmes streichen, tragen ebenfalls etwas zum Luftstrom bei, indem sie den inneren Druck vermindern und dadurch eine Sogwirkung schaffen.

Die Vorteile des Naturzugkühlers sind:

1. Keine mechanischen oder elektrischen Betriebsteile
2. Geringer Unterhaltungsaufwand und geringe Betriebskosten
3. Große Wasserbelastungskapazität
4. Geringere Auswirkungen auf das Klima der Umgebung.

Nachteile sind:

1. Große Abmessungen zur Erzeugung des erforderlichen Luftstromes und zur Verringerung des Reibungswiderstandes.
2. Die Temperatur des eintretenden Wassers muß höher sein als die Lufttemperatur am Trockenthermometer, um eine Luftbewegung hervorzurufen.
3. Steuerung der Kaltwassertemperatur nicht möglich. (Eine Steuerung ist nur in dem Sinne möglich, daß ein Teil des Warmwasserstroms im Bypass am Kühlturm vorbeigeführt und mit dem Kaltwasserstrom gemischt wird).

Bei überwiegender Rückkühlung im geschlossenen Kreislauf haben sich nach Wirtschaftlichkeitsüberlegungen Naturzugkühler durchgesetzt. Aufgrund allgemeiner Untersuchungen kann davon ausgegangen werden, daß bei Blöcken über 250 MW elektrischer Leistung und mehr als etwa 1000 Vollast-Betriebsstunden je Jahr der Naturzugkühlturm wirtschaftlich überlegen ist. Für Kraftwerksblöcke mit 1200 bis 1300 MW elektrischer Leistung erreichen Naturzugkühler Höhen um 170 m und Durchmesser bis 140 m. Die genaue Auslegung eines Kühlturmes ist eingebettet in die wirtschaftlich optimale Auslegung des „kalten Endes“ von Blockeinheiten – beginnend mit dem Expansionsendpunkt der Turbine und endend mit der Wärmeabfuhr an die Umgebung – eine sehr aufwendige Planungsarbeit, die in angemessener Frist nur mit elektronischen Datenverarbeitungsanlagen durchzuführen ist.

1.2 Erfordernis an Zusatzwasser

Alle Kühler, in denen das Wasser unmittelbar mit der kühlenden Luft in Berührung kommt, sind Verdunstungskühler. Der Anteil des durch Verdunstung dem Kreislauf entzogenen Wassers muß ersetzt werden. Voraussetzung für die nasse Rückkühlung ist daher die gesicherte Versorgung mit Zusatzwasser.

Die Menge des erforderlichen Zusatzwassers richtet sich nach dem Anteil der Verdunstung, ist aber auch von innerbetrieblichen Auslegungen abhängig. Da das Zusatzwasser nie chemisch rein ist, muß zur Verhinderung einer schädlichen Konzentration der Inhaltsstoffe (Aufsalzung) eine größere als die verdunstende Menge zugeführt werden. Der überschüssige Teil wird wieder abgegeben (abgeflutet).

Als Maß für die Aufsalzung wird die Eindickungszahl EZ verwendet. Sie wird aus

$$EZ = 1 + \frac{Q_V}{Q_A} = \frac{Q_Z}{Q_A}$$

berechnet

mit $Q_A + Q_V = Q_Z$.

Darin bedeuten

Q_V = Verdunstungsmenge in m^3/s

Q_A = Abflutung in m^3/s

Q_Z = Zusatzwassermenge in m^3/s

Die Verluste durch Spritzwasser werden wegen ihrer Geringfügigkeit vernachlässigt.

Wird das zugeführte Wasser aufbereitet, beträgt die Abflutmenge rund 30 % des hereingenommenen Wassers. Hierdurch läßt sich die Erhöhung des Salzgehaltes im Kreislauf auf rund das 3-fache begrenzen, d. h. $EZ \leq 3$. Soll die Eindickung auf einem geringeren Wert gehalten werden, muß die Abflutung größer gewählt werden. Soll die Aufbereitung des Zusatzwassers vermieden werden (was in Praxis kaum möglich ist), muß mit einer Abflutung bis zu 80 % des Zusatzwassers gerechnet werden.

Auf dieser Grundlage ergibt sich je nach Kraftwerksart, Auslegung der Abflutung und der äußeren Betriebsbedingungen ein Wasserbedarf je 1000 MW elektrischer Leistung zwischen 1 und 4 m^3/s , von denen zwischen 0,3 und 3,2 m^3/s wieder abgeflutet werden. Bei älteren Kühltürmen ist außerdem ein Auswurf von Wassertropfen zu verzeichnen.

Die heutigen werden besser konstruiert und mit einem Wasserabscheider ausgerüstet. Bei ihnen sind im Schwaden innerhalb und außerhalb des Kühlturms nur sehr wenige Tröpfchen mitgerissenen Kühlwassers enthalten und die Auswurfrate ist auf rund 0,002 % der im Kühlkreislauf umlaufenden Wassermenge reduziert.

2. Abhängigkeit des Kühlturm-Betriebes von den meteorologischen Gegebenheiten

2.1 Die wichtigsten Parameter

In einem Kühlturm wird das Wasser von der Temperatur TW_1 auf die Temperatur TW_2 gekühlt. Für die Differenz

$$\Delta T_K = TW_1 - TW_2$$

ist der Begriff „Kühlzone“ (Kühlzonenbreite) gebräuchlich. Die Differenz zwischen TW_2 und der Feucht-Thermometer-Temperatur wird als „Kühlgrenzabstand“ bezeichnet. Zur Beurteilung der Auswirkungen des Kühlturbetriebes auf ein Gewässer ist in Zusammenhang mit dem Wärmehaushalt insbesondere die Kenntnis der

Temperatur TW_2

des wiedereinzuleitenden Abflutwassers in Verbindung mit seiner Menge Q_A sowie in Zusammenhang mit dem Wasserhaushalt die Kenntnis der

Verdunstungsmenge Q_V

von Bedeutung.

Die Temperatur TW_2 hängt theoretisch von folgenden Parametern ab:

- von der Temperatur TL_1 und der relativen Feuchte R der Luft bei Eintritt in den Kühlturm (TL_1 ist die Temperatur des trockenen Thermometers, d. h. die am gewöhnlichen Thermometer abgelesene Lufttemperatur),
- von der Temperatur TW_1 des Wassers beim Eintritt in den Kühlturm und
- von der Luftzahl λ , d. h. dem Verhältnis von Luftdurchfluß zu Wasserdurchfluß.

Die Verdunstungsmenge Q_V ist hauptsächlich vom Dampfdruck-Sättigungsdefizit der umgebenden Luft abhängig. Sie läßt sich aber näherungsweise aus der relativen Luftfeuchte und der Temperatur des feuchten Thermometers bestimmen (s. Abb. 11). (14)

Diese Feuchttemperatur kann mit einem gleichmäßig ventilierten Thermometer gemessen werden, dessen Temperaturfühler mit feuchter Gaze umhüllt ist. Der durch die Verdunstung verursachte Wärmeverbrauch führt zu einer Erniedrigung der vom feuchten Thermometer gemessenen Temperatur.

Die Temperatur des feuchten Thermometers ist die theoretische Grenze, bis zu welcher Wasser durch Verdunstung heruntergekühlt werden kann.

Die relative Feuchte ist das Verhältnis der Menge des in der Luft vorhandenen Wasserdampfes zur Sättigungsmenge bei gleicher Temperatur und gleichem Druck. Sobald die relative Luftfeuchte 100 % erreicht hat, gleicht die Temperatur des feuchten Thermometers der des trockenen Thermometers. Daher gilt: Je niedriger die relative Feuchte, um so größer der Unterschied zwischen den Temperaturen am feuchten und am trockenen Thermometer.

2.2 Verdeutlichung am praktischen Beispiel

In der Praxis wird die Abhängigkeit des Kühlturbetriebs von den meteorologischen Parametern in Kennlinien-Blättern dargestellt. Die Abbildungen 12 und 13 zeigen die Kurven zur Ermittlung der Kaltwassertemperatur T_{W_2} und der Verdunstungsmenge Q_V am Beispiel eines Naturzugkühlturms.

Da derartige Kennlinien nur für konkrete Fälle gelten, wurde das Beispiel für folgende Daten ausgelegt (d. h. diese mußten vorgegeben werden):

Rückzukühlende Wassermenge:	67 000 m ³ /h	(18.8 m ³ /s)
Warmwassertemperatur T_{W_1} :	36,3° C	
Kaltwassertemperatur T_{W_2} :	22,9° C	
Abzuführende Wärmemenge:	896 Gcal/h	(1045 MJ/s)
Kühlzone ΔT_K :	13,4 K	
Feuchtlufttemperatur:	8° C	
Lufttemperatur:	10° C	
rel. Luftfeuchtigkeit:	77 %	
Kühlgrenzabstand:	14,9 K	
Barometerstand:	760 Torr	(1013 mbar)
Luftdurchsatz:	65 000 t/h	
Luftgeschwindigkeit:	am Eintritt zwischen den Stützen 6 m/s am engsten Turmquerschnitt 4,5 m/s	

Alle Temperaturen ändern sich mit den meteorologischen Randbedingungen. Eine Erhöhung der Lufttemperatur z. B. ruft eine Erhöhung der Wassertemperaturen im Kreislauf und damit auch der Temperatur der Abflutung (= Kaltwassertemperatur) hervor.

2.3 Häufigkeit meteorologischer Werte

Sowohl für die Auslegung des Kühlturms bei der Planung als auch für die genauere Abschätzung der von ihm ausgehenden Beeinflussung der Gewässer ist die Kenntnis der statistischen Verteilung der meteorologischen Parameter von Interesse. Aus dieser Kenntnis heraus kann beurteilt werden, wie häufig extreme Witterungssituationen auftreten, bei denen das Einleiten des Abflutwassers mit höheren Temperaturen (z. B. über 30° C) kaum zu umgehen ist.

Einen Eindruck davon vermitteln die Auswertungen des Deutschen Wetterdienstes, die in den Abb. 14 bis 17 (5) wiedergegeben sind. Die Abb. 16 enthält beispielhaft für das Küstengebiet (Bremervörde) und das Oberrheingebiet (Mannheim) eine Analyse der Häufigkeiten des Zusammentreffens der Temperatur am trockenen und am feuchten Thermometer. Die Darstellungen zeigen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Verhältnissen im Küsten- und Binnenland, zumal die Häufigkeitsverteilungen sehr große Streubreiten aufweisen und die häufigsten Werte mit maximal 5,7 Tage/Jahr und 4,1 Tage/Jahr auch nicht sehr ausgeprägt sind. Man erkennt gerade noch zwei Maxima, und zwar eins für den Winter im Bereich um 0° C, wobei Feucht- und Trocken-Thermometer-Temperatur etwa gleich sind und ein zweites für den Sommer mit Differenzen zwischen Feucht- und Trocken-Thermometer-Temperatur um 3 bis 4 K.

Die Häufigkeitsverteilungen der beiden Temperaturen – jede für sich betrachtet – gehen aus

Summenzeile und -spalte hervor. Sie zeigen ebenfalls die sehr breite Streuung der Verteilung dieser Parameter.

Die dargestellten Verteilungen gelten nur für die 14.00-Uhr-Werte, die etwa die Tages-Maxima der Feucht-Thermometer-Temperatur darstellen. Sie würden für jeden Meßzeitpunkt anders ausfallen. Die Abhängigkeit vom Tagesgang zeigt sich in den Abb. 14 und 15, aus denen beispielhaft entnommen werden kann, an wieviel Tagen im Jahr extreme Werte der Feucht-Thermometer-Temperatur – mit den davon abhängigen hohen Verdunstungsverlusten – unter Einschluß des Tagesgangs auftreten. Man erkennt, daß der Tagesgang an der Küste ausgeprägter ist als im Binnenland, und daß dort auch an der gleichen Zahl von Tagen (z. B. 20) nicht so hohe Feucht-Thermometer-Temperaturen überschritten werden ($17,9^{\circ}\text{C}$ zu $18,8^{\circ}\text{C}$ um 14 Uhr). Es kann daraus geschlossen werden, daß Kühltürme in Küstennähe etwas kleiner ausgelegt werden können. Dies geht noch deutlicher aus der Darstellung in Abb. 17 hervor, in der die Überschreitungs-Summenhäufigkeiten (Dauerlinien) der 14.00-Uhr-Werte aufgetragen sind. In Verbindung mit den Kennlinien zur Kaltwasserbestimmung (Abb. 13) kann aus den Dauerlinien auch abgeschätzt werden, wie oft die meteorologischen Randbedingungen extrem hohe Kaltwassertemperaturen ($\text{TW}_2 > 30^{\circ}$) unvermeidbar werden lassen.

2.4 Schlußfolgerung

Bei wirtschaftlich vernünftiger Auslegung fallen in der Kühlturmtasse kreislaufgekühlter Kraftwerke Temperaturen bis zu 35°C an – wenn die extremen Temperaturen auch nur in einzelnen Jahren und nur wenige Stunden lang auftreten. Da im Normalfall das Kaltwasser aus der Kühlturmtasse direkt abgeflutet wird, hat auch die Abflutung diese Temperatur.

Die Temperatur der Abflutung ist auch unabhängig von der Temperatur des zufließenden Wassers. Bei Temperaturwechsel kann die Temperatur des Abflutwassers im Winter 18 K über der Entnahmetemperatur liegen, bei schroffen Sprüngen der Lufttemperatur (starkes Tauwetter nach einer Frostperiode) sind sogar 22 K möglich.

Angaben je 1000 MW elektr. Leistung

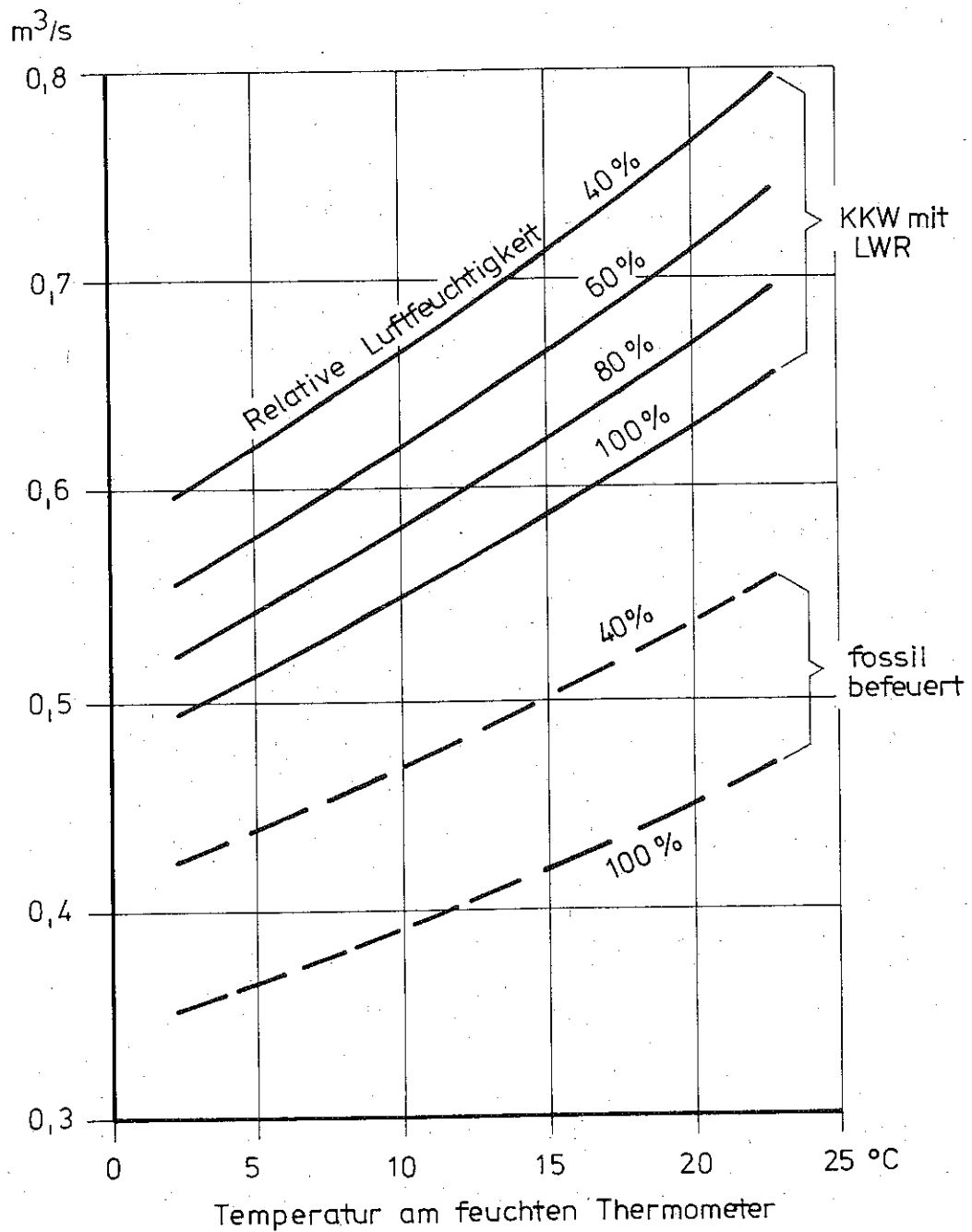


Abb. 11: Spielraum der Verdunstungsmengen in Abhängigkeit vom Kraftwerkstyp und den meteorologischen Bedingungen (nach KROLEWSKI)

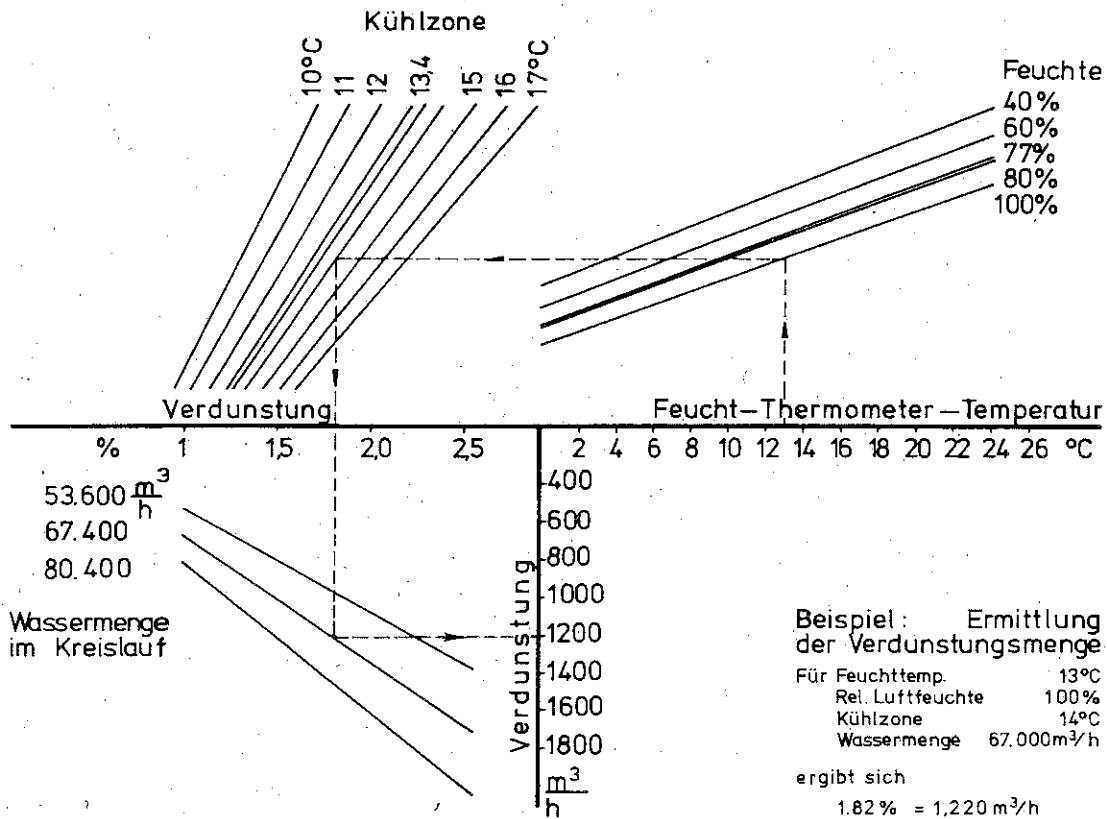


Abb. 12: Naturzugkühlturm – Verdunstung in Abhängigkeit von Feucht-Thermometer-Temperatur, relativer Luftfeuchtigkeit und Wassermenge im Kreislauf –

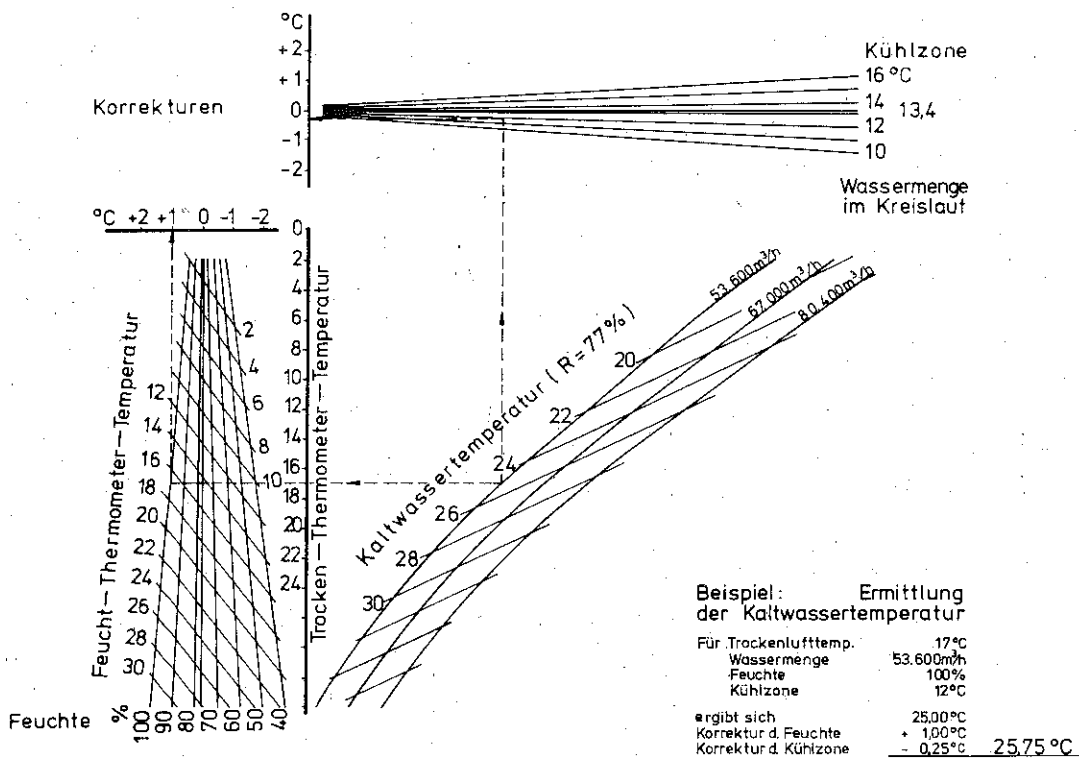


Abb. 13: Naturzugkühlturm – Kaltwassertemperatur in Abhängigkeit von Wassermenge im Kreislauf, Lufttemperatur, relativer Luftfeuchte und Kühlzone –

Bremervörde
1951 bis 1965

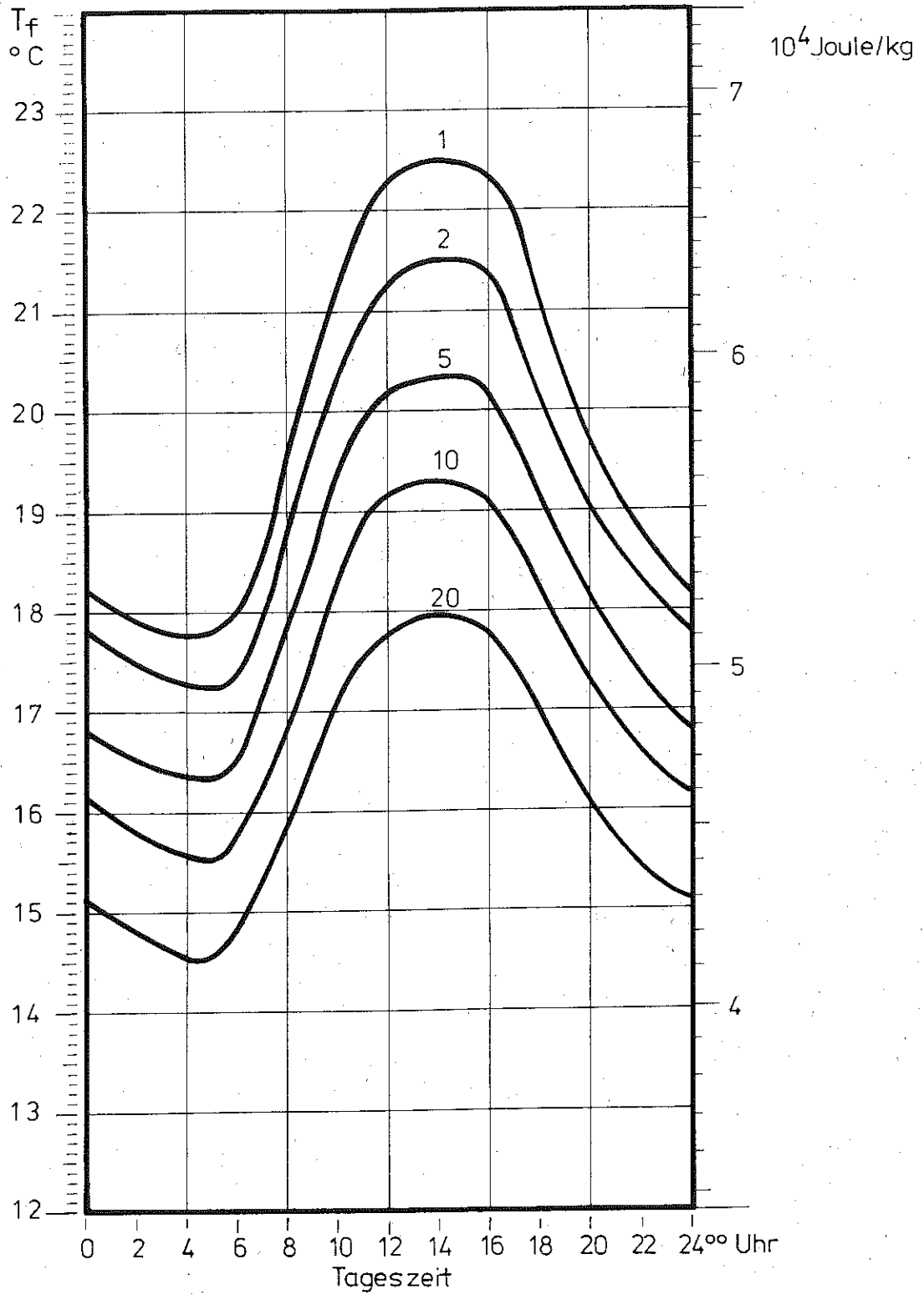


Abb. 14: Tagesgang der Häufigkeit hoher Werte des feuchten Thermometers;
Parameter: Durchschnittliche Zahl der Tage pro Jahr und Tageszeit

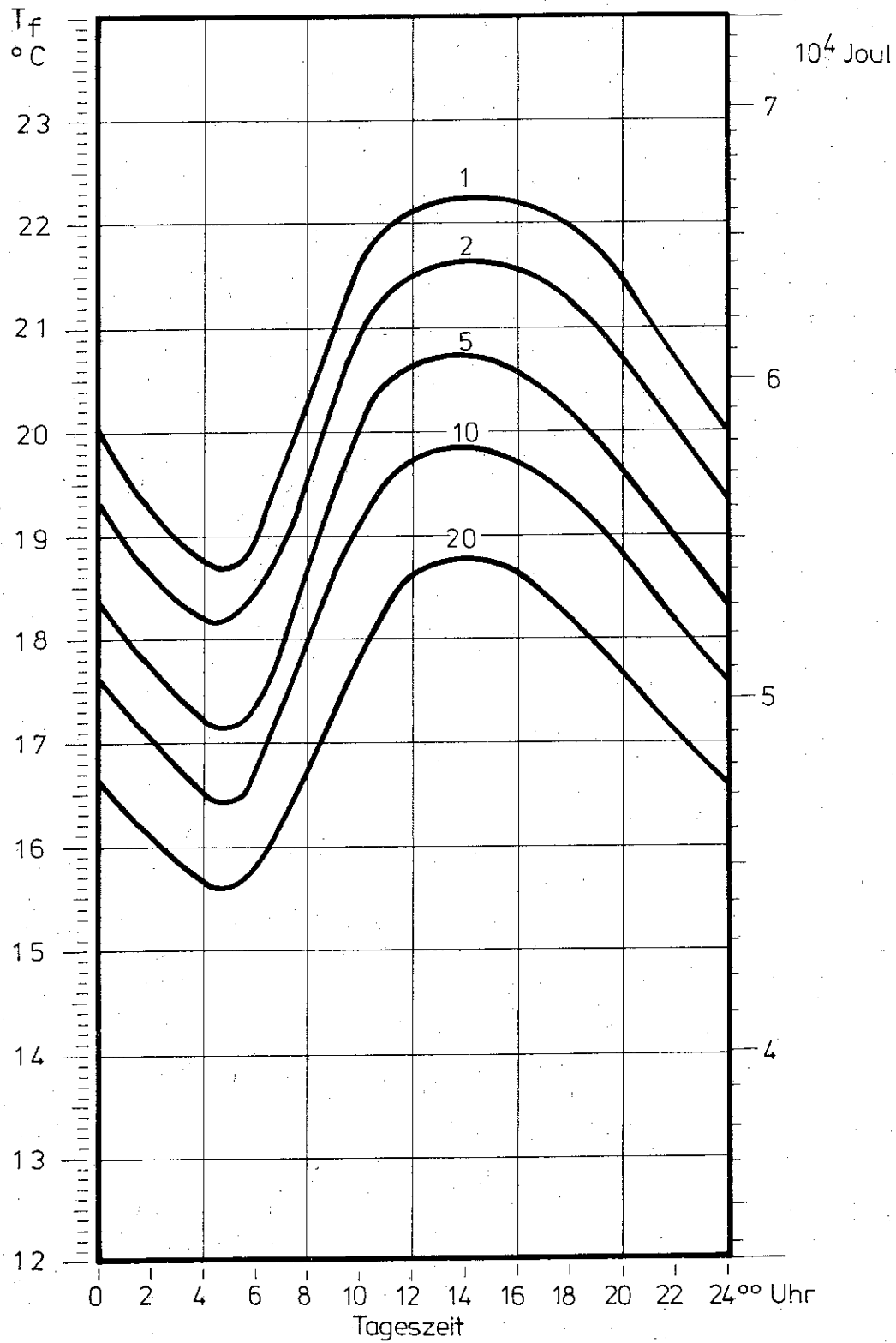


Abb. 15: Tagesgang der Häufigkeit hoher Werte des feuchten Thermometers;
Parameter: Durchschnittliche Zahl der Tage pro Jahr und Tageszeit

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	Summe										
1	-22	-21	-20	-19	-18	-17	-16	-15	-14	-13	-12	-11	-10																								
2																																					
3																																					
4																																					
5																																					
6																																					
7																																					
8																																					
9																																					
10																																					
11																																					
12																																					
13																																					
14																																					
15																																					
16																																					
17																																					
18																																					
19																																					
20																																					
21																																					
22																																					
23																																					
24																																					
25																																					
26																																					
27																																					
28																																					
29																																					
30																																					
31																																					
32																																					
33																																					
34																																					
35																																					
36																																					
37																																					
38																																					
Summe																																					

Abb. 16b: Mittlere Anzahl der Fälle je Jahr mit gleichzeitigen Werten des trockenen ($t^{\circ}\text{C}$) und feuchten ($t_f^{\circ}\text{C}$) Thermometers (Jahresreihe 1951/65, 14.00 Uhr mittlere Ortszeit)

Schwebstoffe stellen im Flußwasser den Hauptanteil der ungelösten Stoffe und erfordern für ihre Entfernung den größten Aufwand. Sie können mit Filter- oder Absetzanlagen (Filtration oder Sedimentation) aus dem Wasser entfernt werden.

Filter gibt es in Form von Schwerkraft- und Druckfiltern. Je nach Beschaffenheit des zu reinigenden Wassers müssen diesem eventuell Flockungsmittel oder Flockungshilfsmittel zugegeben werden, um einen optimalen Filtrationseffekt zu erreichen. In bestimmten Abständen werden die Filter rückgespült, um die aufgenommenen Schwebstoffe zu entfernen. Der Anteil des Rückspülwassers, der Feststoffe in größeren Mengen enthält, wird Absetzbecken und/oder Eindickern zugeführt, die das Schlammvolumen reduzieren. Durch weitergehende Maßnahmen, wie Schlammmentwässerung über Zentrifugen, Filterpressen oder dergleichen gelangt man zu stichfesten und deponierfähigen Schlämmen.

Absetzanlagen beruhen auf dem Prinzip der Sedimentation. Ohne Hilfsmittel können dadurch dem Zusatzwasser jedoch nur die leicht absetzbaren Schwebstoffe entzogen werden. Zur Erfassung der schwer absetzbaren Bestandteile (feinstverteilte oder kolloidale Stoffe) werden dem Wasser Flockungsmittel, wie Eisen- oder Aluminiumsalze, zugegeben, die die stabilisierende elektrostatische Abstoßung der Partikel aufheben, so daß sich solche Stoffe durch Koagulation zu Mikrofloccen zusammenschließen. Durch Zugabe von Flockungshilfsmitteln (z. B. Polyelektrolyten) kann der Zusammenschluß zu größeren, schwereren Floccen noch beschleunigt werden. Der abgesetzte Schlamm wird einer weiteren Behandlung zugeführt. Als Sammelbegriff für derartige Wasseraufbereitungsanlagen nach dem Flockungs-, Fällungs- und Schlammkontaktverfahren hat sich die Bezeichnung X-ator eingebürgert. Neuerdings wird als vielversprechende Variante auch der Parallelplattenabscheider (mit Vorbecken und integrierem Eindicker) eingesetzt.

3.2 Chemische Wasseraufbereitung

Die Karbonathärte des Kreislaufkühlwassers muß wegen der Gefahr von Kalziumkarbonatausscheidungen in Grenzen gehalten werden (max. 1,0-1,25 mmol/l (= 2,0-2,5 mval/l bzw. 5,6-7° dH; 120-150 mg/l HCO₃), weil durch die intensive Belüftung im Kühlturm das gelöste, freie Kohlendioxid ausgetrieben wird und demzufolge die Löslichkeit von Kalziumhydrogenkarbonat abnimmt. Ausscheidungen behindern den Wärmeübergang in Wärmeaustauschern (z. B. Kondensatoren). Da der Karbonathärtegehalt in Oberflächengewässern meistens über 2 mval/l liegt und durch Eindickung im Kühlkreislauf noch vervielfacht würde, ist eine Entkarbonisierung des Zusatzwassers nötig. Bis zu Karbonathärten von 6-7 mval/l im eingedickten Kreislaufwasser kann jedoch neben die Entkarbonisierung eine Härtestabilisierung durch Konditionierung mit anorganischen Polyphosphaten oder Organophosphaten treten.

Für die Entkarbonisierung kommen heute im wesentlichen zwei Verfahren zur Anwendung:

- Säure-Entkarbonisierung mittels Schwefelsäure (seltener Salzsäure) und
- Kalk-Entkarbonisierung mittels Kalkhydrat in einem X-ator.

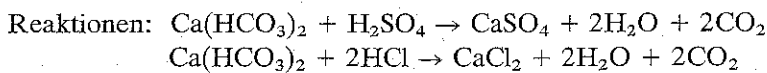
(Anmerkung: 1° dH = 10 mg/l CaO = 2,8 mval = 0,01785 mmol)

Darüber hinaus gibt es die Möglichkeiten, in Ionenaustauschern oder mit Kalk im Schnellreaktor zu entkarbonisieren. Nach dem Ionenaustauschverfahren wird in diesem Falle eine Teilentsalzung des Zusatzwassers erreicht. Hierbei ist die Salzfracht, die an den Vorfluter abzugeben ist,

durch die anfallenden Regenerierabwässer letztlich geringfügig höher als bei der Säure-Entkarbonisierung. Auch der Aufwand ist erheblicher. Dieses Verfahren ist ohnehin nur für die Aufbereitung sehr kleiner Wassermengen anwendbar. Die Kalk-Entkarbonisierung im Schnellreaktor kann durch Verunreinigungen der Gewässer gestört werden und ist dann nicht anwendbar.

3.2.1 Säure-Entkarbonisierung

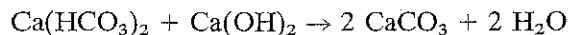
Bei der Dosierung von Säure wird die Karbonathärte in Nichtkarbonathärte umgewandelt.



Bei diesen Reaktionen verringert sich der Gehalt an Hydrogenkarbonationen auf das gewünschte Maß, der Sulfationen- bzw. Chloridionengehalt hingegen steigt äquivalent an. Die Summe der Anionenäquivalente bleibt somit konstant. Die in mg/l ausgedrückten Anionenkonzentrationen sinken sogar ab. Es wird ein bestimmter Teil der Hydrogenkarbonationen durch Sulfat- oder Chloridionen ersetzt. Die mit dem Kühlturmabflutwasser pro Zeiteinheit abgegebene Salzmenge ist dementsprechend die gleiche wie die mit dem Zusatzwasser entnommene. Die Salzkonzentration im Vorfluter erhöht sich nur in dem Maße, wie die Verdunstungsverluste im Kühlturm den Gesamtabfluß schmälern. Bei diesem Verfahren fallen aus der Entkarbonisierung keine festen Stoffe an, die als Schlamm abgeführt werden müssen, sofern – und das bezieht sich ausschließlich auf Sulfate bzw. Kalziumsulfationen – deren Löslichkeitsprodukt nicht überschritten wird.

3.2.2 Kalk-Entkarbonisierung in einem X-ator

Die Fällung der Karbonathärte als Kalziumkarbonat vollzieht sich nach folgender Gleichung:



Dieses Verfahren der Entkarbonisierung unterscheidet sich von der Säuredosierung dadurch, daß ein Teil der im Wasser gelösten Erdalkalibikarbonate, nämlich die Karbonathärte, aus dem Zusatzwasser entfernt wird. Dadurch erniedrigt sich der Gesamtsalzgehalt. Infolgedessen werden mit dem Abflutwasser weniger Salze in den Vorfluter zurückgeführt als mit dem Zusatzwasser entnommen werden. Diesem Vorteil stehen oftmals chemisch-technische Schwierigkeiten gegenüber, die von Verunreinigungen des Oberflächenwassers durch organische Stoffe und Waschmittelrückstände sowie von niedrigen Wassertemperaturen in den Wintermonaten ausgehen. Ein Nachteil des Verfahrens ist die Tatsache, daß das in großen Mengen anfallende Kalziumkarbonat als Schlamm beseitigt werden muß, was Probleme an anderer Stelle schaffen könnte.

3.3 Möglichkeiten der technischen Durchführung der Zusatzwasseraufbereitung

Die oben beschriebenen zwei Stufen der Zusatzkühlwasseraufbereitung – Reinigung und chemische Aufbereitung – können sowohl nacheinander als auch in zum Teil integrierten Anlagen durchgeführt werden. Zur Verdeutlichung der möglichen Anlagenkombinationen sollen einige – häufig angewandte – Beispiele dienen. In allen Fällen sei den aufgeführten Komponenten der Durchgang des Wassers durch Grob- und Feinrechen sowie Siebanlagen vorangestellt.

Variante A (Kiesfilter – Schwefelsäure-Entkarbonisierung):

1. Kiesfiltration, eventuell unter Zugabe von Flockungsmitteln oder Flockungshilfsmitteln
2. Entkarbonisierung durch Schwefelsäuredosierung
3. Entfernung der freigesetzten Kohlensäure
4. Behandlung des Kiesfiltrerrückspülwassers in einem Absetzbecken

Variante B (X-ator – Schwefelsäure-Entkarbonisierung):

1. Entstabilisierung der kolloiden Bestandteile durch Flockungsmittelzugabe
2. Koagulation mit Schlammrückführung unter eventueller Zugabe von Flockungshilfsmitteln
3. Sedimentation im Absetzraum des X-ators und Schlammeindickung
4. Entkarbonisierung durch Schwefelsäuredosierung
5. Entfernung der freigesetzten Kohlensäure

Variante C (Lamellenseparator – Schwefelsäure-Entkarbonisierung):

1. Entstabilisierung der kolloidalen Bestandteile durch Flockungsmittelzugabe im Vorbecken
2. Koagulation unter eventueller Zugabe von Flockungshilfsmitteln im Vorbecken
3. Sedimentation in einem Lamellenseparator mit nachgeschaltetem (darunterliegenden) Schlammeindicker
4. Entkarbonisierung durch Schwefelsäuredosierung
5. Entfernung der freigesetzten Kohlensäure

Variante D (Lamellenseparator – Kalkentkarbonisierung):

1. Fällung der Karbonathärte mittels Kalk in Vorbecken
2. Entstabilisierung der kolloidalen Bestandteile durch Flockungsmittelzugabe in Vorbecken
3. Koagulation unter eventueller Zugabe von Flockungshilfsmitteln in Vorbecken
4. Sedimentation in einem Lamellenseparator mit nachgeschaltetem (darunterliegenden) Schlammeindicker

4. Biozönotische Gegebenheiten in Kühlkreislaufsystemen und die sich einstellenden Einleitungs- und Kondensatortemperaturen

Die bisherigen Betrachtungen und Folgerungen über zulässige Temperaturerhöhungen bei Einleitung erwärmten Wassers in die Gewässer orientierten sich bislang fast ausschließlich an den zu erwartenden Änderungen des Sauerstoffhaushaltes. Dies wird dadurch verständlich, weil über den Einfluß der Temperatur auf die Sauerstoffzehrungsvorgänge, vornehmlich initiiert durch die Vorgänge bei der Abwasserreinigung, eine nicht geringe Fülle von Erfahrungswerten vorliegt. Dies darf aber nicht darüber hinwegtäuschen, daß bei dieser Betrachtungsweise lediglich die durch die Mikroorganismen (fast ausschließlich Bakterien und Pilze) verursachten biogenen Auswirkungen organischer Stoffe hinsichtlich Sauerstoffzehrung (Biochemischer Sauerstoffbedarf) berücksichtigt werden, ohne jedoch die sie verursachenden Einzelorganismen systematisch zu erfassen.

Bei der Gruppenbetrachtung des Sauerstoffzehrungsvorganges bleibt auf diese Weise die durch Umwelteinflüsse bedingte innere Verschiebung der Sauerstoffzehrungsbiozönose unberücksichtigt. Man registriert lediglich die mit einfachen Mitteln feststellbare Sauerstoffzehrung. Ist eine solche meßbar, wird deduktiv auf die Anwesenheit heterotropher Mikroorganismen geschlossen, wobei die möglicherweise durch die Untersuchungs- (Zehrungs-) Temperatur bedingten biozönotischen Änderungen gegenüber der Ausgangstemperatur unberücksichtigt bleiben. So wird unterstellt, daß beispielsweise die in einer Wasserprobe mit einer Temperatur von 4 °C enthaltene Mikroflora pauschal die bei 20 °C bestimmte Sauerstoffzehrung trotz eines Temperatursprungs von + 16 K verursacht. Es kann hierbei nicht ausgeschlossen werden, daß in diesem Falle bestimmte Bakterienarten bei dieser Temperatur neben anderen noch zu nennenden Faktoren für diesen Bereich ein optimales Milieu gefunden haben und nunmehr dominierend die Sauerstoffzehrung bedingen. Die in diese Situation gezwängte Population und ihre Lebensäußerung darf nun keineswegs als typisch für das Geschehen im Gewässer bezeichnet werden, weil durch die Bedingungen der analytischen Methode jegliches Mitwirken autotropher Organismen ausgeschlossen ist. Andererseits zeigt aber dieses Verhalten eine außerordentliche Variationsbreite der heterotrophen Organismen, die – so sei unterstellt – ursprünglich einem aeroben Milieu entstammten.

So wird deutlich, daß die Variationsbreite innerhalb einer aeroben heterotrophen Mikrobiozönose außerordentlich groß ist und die jeweils dominierenden Arten sich im wesentlichen an den Faktoren

Nahrungsangebot,
Sauerstoff und
Temperatur

orientieren.

Die heterotrophe Mikrobiozönose stellt unzweifelhaft nur einen, jedoch ganz bedeutsamen, Teil der Gesamtbiozönose im Gewässerbiotop dar, die hinwiederum ebenso von den genannten drei Faktoren und zusätzlich dem Licht abhängig ist. In der sich einstellenden Nahrungskette von den autotrophen Organismen bis hin zu den Fischen (und letztlich wieder bis hin zu den heterotrophen Mikroorganismen) wird ebenso die Variationsbreite der Biozönose in Abhängigkeit von den Umweltbedingungen erkennbar werden. Unter diesen Gesichtspunkten wäre es nicht richtig, lediglich eine Organismenart als symptomatisch für die Gesamtbiozönose zu betrachten. So ist beispielsweise der Fisch lediglich ein Glied in der ökologischen Kette. Die Praxis jedoch zeigt, daß mit Ausnahme der heterotrophen, meist pauschal erfaßten Mikroor-

ganismen, Temperaturgrenzwerte für andere im Wasser lebende Organismengesellschaften nicht vorliegen, sondern nur für einzelne Arten. Man glaubt sich deshalb berechtigt, deduktiv vom Einzelorganismus auf die Biozönose schließen zu können. Die Variationsbreite einer Biozönose ist aber außerordentlich groß, wie die vorliegenden Erfahrungen zeigen. Sie läßt sich wohl kaum in vitro bestimmen, weil in einen Versuchsaufbau wohl niemals alle umweltrelevanten Faktoren eingehen können. Der zwischenzeitlich allgemein anerkannte Grenzwert hinsichtlich der zulässigen Temperatur in einem Gewässer in der maßgebenden Sommerperiode von

$$T_G = 28 \text{ }^\circ\text{C}$$

ist als rechnerisch ermittelte Mischtemperatur zu verstehen, die in bestimmten Zonen eines Gewässers nach Warmwassereinleitungen überschritten werden kann. Solche Überschreitungen sind je nach dem Verschmutzungsgrad des Vorfluters tolerierbar. Die genannten Temperaturen sind somit ein Orientierungsrahmen, in den sich die abzugebenden Wärmemengen einpassen müssen. Sie gehen konform mit mehreren bereits erlaubten oder bewilligten Warmwassereinleitungen und sind deshalb als realistisch zu werten.

Kann mit Durchlaufkühlung dieses Limit nicht eingehalten werden, sind Kühltürme in Betrieb zu nehmen, die nach dem in Abb. 6 aufgezeigten Schema den Erfordernissen des Gewässers entsprechend geschaltet werden können. Maßgebend sind hierbei neben der Kühlwassermenge die jeweiligen Aufwärmspannen im Kühlwasser ΔT_E , die Differenz zwischen Entnahme- und Einleitungstemperatur.

Für die nachstehend aufgeführten Kühlsysteme werden im allgemeinen folgende Werte eingehalten:

Durchlaufkühlung	Ablaufkühlung
$T_E = 30 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_E = 33 \text{ }^\circ\text{C}$
$\Delta T_E = 10\text{--}15 \text{ K}$	$\Delta T_E = 10\text{--}15 \text{ K}$

Man erkennt aus dieser Aufstellung, daß unter extremen sommerlichen Temperaturen bei gleichbleibenden Kühlwassermengen und nahezu gleichen Ablauftemperaturen hinsichtlich der Wärmemengen kein gravierender Unterschied bestehen dürfte. Der Vorteil der Ablaufkühlung gegenüber der Durchlaufkühlung ist deshalb wohl ausschließlich durch den erhöhten Sauerstoffgehalt gegeben, der meist im Bereich der Sauerstoffsättigung liegt.

Kann mittels einer Ablaufkühlung die Wärmemenge nicht im erforderlichen Umfange reduziert werden, ist die Kreislaufkühlung anzuwenden.

Die Kreislaufkühlung ist, wie in Kap. I ausgeführt, kein geschlossenes System. Dies erklärt sich u. a. aus den erforderlichen Zusatzwassermengen, die je nach Beschaffenheit und Zustand des Ausgangswassers zu einer Abfltrate bis zu 80 % des Zusatzwassers führen kann. Im allgemeinen bleibt man bestrebt, die Menge des Abflutwassers, insbesondere bei Gewässern mit geringer Wasserführung, so gering als möglich zu halten, so daß etwa nur bis 10 % der Umlaufwassermenge wieder in den Vorfluter gelangen. Hierbei können Einleitungstemperaturen bis zu

$$35 \text{ }^\circ\text{C}$$

auftreten. Die Aufwärmspannen sind je nach Jahreszeit (siehe Nr. 2) sehr unterschiedlich. Ein angestrebtes ΔT_E von 15 K kann zwar zu bestimmten Zeiten eingehalten werden, im Winter

kann die Einleitungs­temperatur 18 K über der Entnahmetemperatur liegen, bei schroffem Anstieg der Lufttemperatur (starkes Tauwetter nach einer Frostperiode) sind sogar 22 K möglich.

Hierbei muß noch mit Nachdruck darauf hingewiesen werden, daß im Rahmen einer biozönotischen Bewertung bei der Kreislaufkühlung maßgeblich die bedeutsam reduzierte Wärme­fracht ist und dementsprechend möglicherweise höhere Aufwärmspannen des in seiner Menge wesentlich verminderten Kühlwassers toleriert werden müssen. Zum besseren Verständnis dieser Diktion sind – Wiederholungen nicht ausgeschlossen – nachstehende Erläuterungen erforderlich:

1. Eine Kreislaufkühlung mittels Ventilator- oder Naturzug-Kühlern (Kühltürmen) ist kein vollständig geschlossenes System. Stets ist die Zufuhr von Frischwasser zum Ausgleich der Verdunstungsverluste und zur Einhaltung eines maximal zulässigen Salz­gehaltes (Eindickungszahl EZ siehe Abschn. 1.2 „Erfordernis an Zusatzwasser“) erforderlich, wie andererseits der überschüssige Teil des Zusatzwassers wieder in den Vorfluter zurückfließt (abgeflutet wird).

Vollständig geschlossene Kühlsysteme „Trockenkühlung“ sind zwar bekannt und bei kleineren Kraftwerkeinheiten bereits im Einsatz. Für ihre Anwendung bei den heute gebauten oder in der Planung befindlichen großen Kraftwerkseinheiten sind jedoch Weiterentwicklungen erforderlich, so daß die Trockenkühlung gereift wohl erst im nächsten Jahrzehnt zum verstärkten Einsatz zur Verfügung steht.

2. Es kann als bekannt und unbestritten vorausgesetzt werden, daß das Naßkühltürme passierende Wasser mit Sauerstoff bis zur Sauerstoffsättigung angereichert wird. bzw. mit Sauerstoff übersättigte Wasser bis zur Sättigung entgasen.
3. In biologischer Hinsicht ist der Kühlturm ein Biotop mit einer ihm zugehörigen Biozönose. Das heißt, daß im Kühlturm Organismen leben.

Hierbei sind folgende Faktoren von wesentlicher Bedeutung: Nährstoffangebot – Temperatur – Licht/Dunkelheit – Aufprall des Wassers.

Der Sinn des Kühlturms besteht darin, durch eine Vergrößerung der Oberfläche des ursprünglich geschlossenen Wasserkörpers den Abkühlungseffekt zu beschleunigen. Dies wird durch Versprühen des Wassers und durch Verrieselung über die etagenförmigen Einbauten im Kühlturm bewirkt. Hierbei zeigen sich zwei Erscheinungsformen, nämlich die Tropfenbildung und das Abfließen von der Rieselfläche in mehr oder weniger dünnem Strahl. Eines aber ist beiden Formen eigen: das Wasser prallt von der höheren Rieselfläche kommend auf die nächsttieferliegende Fläche auf. Je nach Fallhöhe können hierbei im Wasser befindliche Teilchen beim Aufprall zerkleinert werden. Das gleiche gilt für größere Organismenformen, die beim Aufprall meist platzen. Es treten gleiche Verhältnisse wie in der Natur auf. Beispielsweise wird das aus dem Bodensee kommende Zooplankton, vornehmlich das Crustaceenplankton, auch bestimmte größere Algenarten, wie Volvox-Kolonien, durch den Rheinfall bei Schaffhausen zerschlagen. Anders verhalten sich dagegen kleinere Formen wie Bakterien, Pilze, bestimmte Diatomeen, Chloro- und Cyanophyceen. Sie sind befähigt, auf den Rieselflächen gleichsam einen biologischen Rasen zu bilden, zwar meist nicht unmittelbar an der Auftropfstelle sondern vielmehr im Spritzbereich. Hierbei überwiegen wegen der ungünstigen Belichtungsverhältnisse (meist Dunkelheit) die Heterotrophen, lediglich in den oberen Bereichen des Kühlturms können auch autotrophe Formen gefunden werden. Die auf den Rieselflächen

lebenden Organismen sind hinsichtlich der Temperatur teils mesophil, teils thermophil, teils indifferent. Der Umfang ihrer Zuwachsraten (Produktion) richtet sich nach der Menge der ihnen zugeführten Nahrungsstoffe, eine Begrenzung durch den Sauerstoffgehalt ist nicht gegeben. Der Überschuss der produzierten Biomasse wird mangels ausreichender Haftmöglichkeiten abgespült und gelangt in die Kühlturmtasse und aus dieser mit dem Abflutwasser in den Vorfluter. Die Siedehaut auf den Riesel- oder Prallflächen von Kühltürmen wurde mehrfach untersucht, sie baut sich aus Bakterien und Pilzen, oft haftend an kleinsten Mineralkörnchen auf. In diesen Rasen wurden verschiedene Protozoen- und Rotatorienarten neben Eisenbakterien und Vermes festgestellt. Ebenso wurden auffallenderweise Diatomeen (neben weniger pennaten Formen, insbesondere *Melosira varians*) in lebendem Zustand beobachtet. Es besteht im Prinzip wohl eine gewisse Analogie zum Tropfkörper, doch ist im Kühlturm die Art der Benetzung des biologischen Rasens anders als im Tropfkörper. Hinsichtlich der Wirkungsweise des Kühlturmes als biologische Wasserreinigungsanlage liegen Untersuchungsergebnisse über das Zehrungsverhalten des Kühlwassers/Zusatzwassers und des eingeleiteten Abflut-/Zusatzwassers vor, die ausweisen, daß die Menge der Sauerstoff zehrenden organischen Stoffe durch den biologischen Abbau im Kühlturm reduziert wird. Bezieht man in diese Betrachtung auch Fische ein, die in der Kühlturmtasse nach den bisherigen Erfahrungen vorzüglich gedeihen können und die sich wohl in erster Linie mit der im Kühlturm produzierten und abgeschwemmten Biomasse ernähren, so kommt man zu einem vielleicht überraschenden Ergebnis: Der Biotop Kühlturm hat eine dem Ausgangswasser entstammende, möglicherweise selektierte, vorwiegend heterotrophe Biozönose, deren Grundnahrung vorwiegend durch die allochthonen organischen Inhaltsstoffe des Ausgangswassers gedeckt wird und daraus eine überschüssige Biomasse produziert, die Fischen als Nahrungsquelle dienen kann. In logischer Folge könnte sich aus dieser Erkenntnis die Forderung ergeben, daß, wenn dem nicht übergeordnete betriebliche Belange entgegenstünden, in der Kühlturmtasse Fische gehalten werden müßten, um die produzierte Biomasse zu verwerten.

Im Prinzip ist diese Erkenntnis uralt und wurde nach der Entwicklung des Tropfkörpers im Jahre 1894 durch Corbett in vielen Fällen praktiziert. Die seinerzeitigen Versuche jedoch scheiterten an der ungenügenden Belüftung des aus den Tropfkörpern abfließenden Wassers, so daß die im „Nachklärbecken“ eingesetzten Fische verendeten. In vorliegendem Falle ist jedoch das Wasser im „Nachklärbecken“ = Kühlturmtasse nahezu mit Sauerstoff gesättigt. Den in den Kühlturmtassen angetroffenen Fischen kann zweifellos ein indikatorischer Wert beigemessen werden.

Die zulässige Einleitungstemperatur muß sich an den möglichen Folgen für das Gewässer bei Berücksichtigung aller Fakten orientieren. Von Vorteil ist neben der Sauerstoffanreicherung eine Verminderung der Schmutzfracht. Unter Beachtung der Vor- und Nachteile ist folgende zulässige Einleitungstemperatur für Abflutwasser aus Kreislaufbetrieb angemessen:

$$\begin{aligned} \max T_E &= 35 \text{ }^\circ\text{C} \\ (\Delta T &= 15-18 \text{ K; Temperaturdifferenz zur Gewässertemperatur}) \end{aligned}$$

Im Verfahrensablauf bei der Energiegewinnung wird der aus der Turbine abströmende Dampf über ein mit Wasser gekühltes Röhrensystem, den Kondensator, geleitet und als Wasser niedergeschlagen (kondensiert). Während die Verhältnisse in den Kondensatorrohren hier nur wenig interessieren, haben die Gegebenheiten an den und um die Kondensatorrohre oder -flächen doch Bedeutung.

Die bisherigen Vorstellungen über Auswirkungen des Wärmeüberganges in den Kondensatoren auf die im Kühlwasser enthaltene Organismenwelt sind außerordentlich kontrovers, sie reichen

von der Letalwirkung bis zur Steigerung der Biofunktionen (Aktivierung) durch den Kühlungsprozess. Faßt man den bisherigen Kenntnis- und Erfahrungsstand zusammen, zeichnet sich folgendes ab:

1. Die Wassertemperaturen im Kondensator (gemessen am Kondensatorausgang) können Werte bis 42 °C (extrem 45 °C) erreichen, sie liegen bei der Durchlaufkühlung wesentlich niedriger, höher bei der Ablaufkühlung (~ 42 °C). Das ΔT_E schwankt dementsprechend und erreicht bei Ablaufkühlung bis 18 K, bei Kreislaufkühlung im Sommer etwa 18 K, im Winter bis zu 30 K als Differenz zwischen Warmwasserzulauf zum Kühlturm und Flußwassertemperatur.
2. Die Vorstellung, daß Organismen im Kondensator gesamthaft abgetötet werden trifft nicht zu. Dies hat folgende Gründe:

Jede Belastung für einen Organismus setzt sich zusammen

- a) aus der Schwere der Belastung
- b) aus der Einwirkzeit (Expositionszeit) und
- c) aus der oft artspezifischen Empfindlichkeit des Organismus.

Die Biologie des Kühlkreislaufs ist zum einen bestimmt durch die planktischen Organismen, zum anderen durch die Aufwuchs-Organismen.

Das Plankton wird passiv verfrachtet und mit dem Kühlwasserstrom einer wechselnden Belastung unterworfen.

Die Organismen des Aufwuchses bestehen – wie diejenigen des Planktons – aus Algen, Bakterien, Pilzen, Protozoen und niederen Tieren. Diese Organismen sind aber stationär und siedeln sich in den für sie günstigsten Bereichen an. Entsprechend den vorhandenen Bedingungen ist der Aufwuchs mehr oder minder selektiv zusammengesetzt.

Somit ist es das Plankton, das durch die Einwirkungen wechselnder Drücke, wechselnder Temperaturen und chemischer Substanzen besonders belastet wird, sofern das Milieu seine Entfaltung gestattet. In der Regel reichen die auftretenden Temperaturen nicht aus, um eine Schädigung oder ein Absterben des Planktons zu bewirken. Hinzu kommt, daß auch die Expositionszeit von wenigen Minuten gering ist. Durch den Wechsel von Aufwärmung und Abkühlung wird auf bakterielle Ruhestadien und Dauerformen (z. B. Sporen) ein Reiz ausgeübt, der eine physiologische Aktivierung dieser Stadien bedingt. Dadurch kann die Lebendzellzahl (Koloniezahl) eine bis zwei Zehnerpotenzen höher liegen als im Zusatzwasser.

Werden – selbst kurzfristig – Temperaturen erreicht, die 30° bis 35 °C deutlich übersteigen, so wird eine zunehmende Belastung des Planktons zunächst in einer Hemmung seiner Aktivität sichtbar. Beim Phytoplankton nimmt die Photosyntheseleistung ab, während die Konzentration an Chlorophyllabbauprodukten zunimmt.

Die Dehydrogenaseaktivität psychrophiler Bakterien ist ab 30 °C herabgesetzt. Ab 40 °C erniedrigt sie sich auch bei mesophilen Bakterien erheblich.

Diese Erkenntnisse bedeuten, daß selbst bei den höchsten in Kondensatoren gemessenen Temperaturen von 45 °C keine Eiweißdenaturierung und auch kein „Hitzetod“ eintritt, dies umso mehr, als der Zeitfaktor bei der Erwärmung des Wassers im Kondensator weit unterhalb

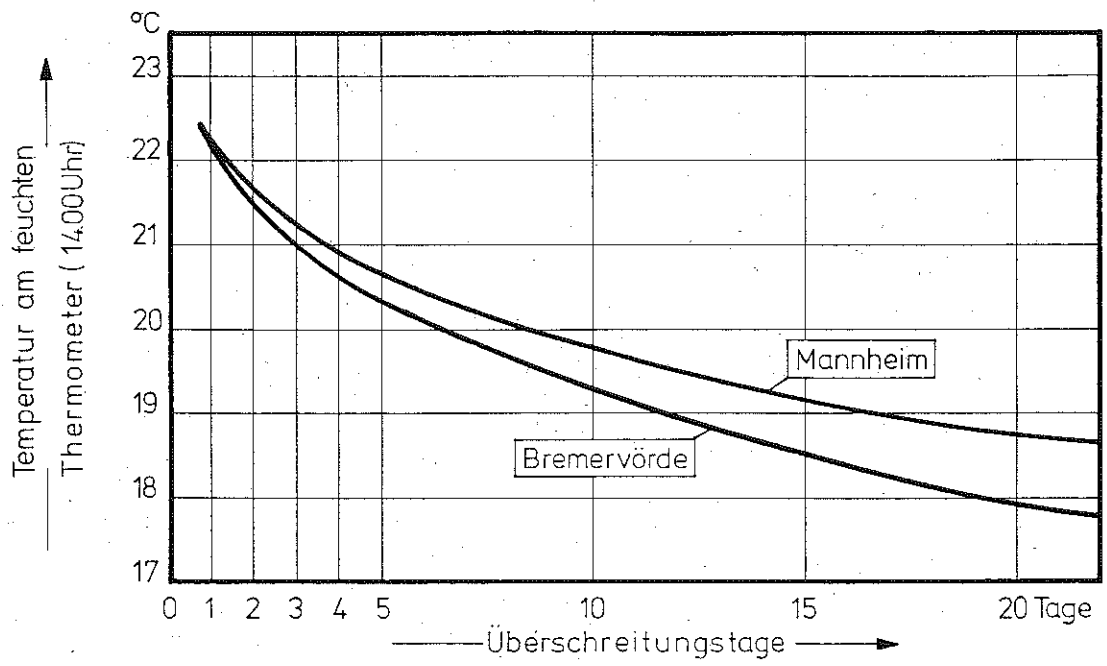


Abb. 17: Häufigkeit des Überschreitens der Tageshöchsttemperatur (14.00 Uhr) am feuchten Thermometer

3. Wasseraufbereitung für den Kühlturbetrieb

Zur Verwendung als Zusatzwasser bei Umlaufkühlung mit offenem Kühlkreislauf (Kreislaufkühlung) muß für größere Kraftwerke Oberflächenwasser herangezogen werden. (12; 20; 22) Dieses ist nicht rein; es enthält ungelöste und gelöste Stoffe. Die ungelösten Stoffe lassen sich einteilen in

Geschiebe,
Schwimmstoffe und
Schwebstoffe.

Von den gelösten Stoffen haben die Salze, hauptsächlich die

Cloride,
Sulfate und
Hydrogencarbonate

besondere Bedeutung.

Das Oberflächenwasser ist in seiner natürlichen Qualität nicht als Zusatzwasser für den Kühlturbetrieb verwendbar. Es muß in jedem Falle mechanisch gereinigt und nach Beschaffenheit chemisch aufbereitet und/oder konditioniert werden. Das dem Gewässer als Zusatzwasser entnommene und diesem nach seiner Verwendung im Betrieb teilweise zurückgegebene Wasser erfährt durch die Reinigung und Aufbereitung einerseits und durch die Verwendung im Betrieb andererseits eine Veränderung seiner qualitativen Eigenschaften. Durch die Reinigung werden dem Wasser ungelöste Inhaltsstoffe entzogen. Durch die chemische Aufbereitung werden die gelösten Inhaltsstoffe in ihrer Zusammensetzung verändert und, je nach Verfahren, auch reduziert. Im Falle der Konditionierung sind die eingesetzten Mengen an erforderlichen Stoffen vernachlässigbar klein gegenüber den übrigen Inhaltsstoffen des Wassers.

Durch den Kühlturbetrieb selbst werden infolge der Verdunstung die Inhaltsstoffe konzentriert. Während der Verrieselung des Wassers im Kühlturm erfolgt eine intensive Anreicherung mit Sauerstoff und Verminderung überschüssiger Gase (z. B. Kohlendioxid).

Bei der Reinigung fallen die dem Wasser entzogenen Anteile als Rechen- und Siebgut, Schwimmstoffe und als Schlamm an. Im Falle der chemischen Aufbereitung können je nach Art der Behandlung zusätzlich größere Schlammengen entstehen. Die Abfälle müssen an geeigneter Stelle in einer für die Umwelt schadlosen Weise beseitigt – deponiert – werden. In der ökologischen Beurteilung des Kühlturbetriebes sind deshalb die Probleme der Wassermenge und der Wasserqualität sowie die Probleme der Deponie der Abfallstoffe integriert zu betrachten.

3.1 Reinigung des Zusatzwassers

Geschiebe wird bei der Entnahme von Zusatzwasser aus dem Fluß durch eine geeignete Gestaltung des Entnahmebauwerks ferngehalten. Soweit dies nicht möglich ist, muß es in einem Sandfang entfernt werden.

Schwimmstoffe, d. h. Bäume, Äste, Glas- und Kunststoffgegenstände, Laub, Tierkadaver usw. werden von Grob- und Feinrechen zurückgehalten und dem Wasser mittels Rechenreinigungsanlagen entnommen. Feinste Schwimmstoffe und gröbere Schwebstoffe werden in Siebanlagen entfernt.

des erforderlichen Zeitletalfaktors bei Temperaturen im Bereich der Eiweißdenaturierung liegt. Diese Aussage deckt sich mit den Erfahrungen im Kraftwerksbetrieb. So dürfte hinreichend bekannt sein, daß sich die Rohre im Kondensator an den kühlenden Flächen außer mit Karbonatausscheidungen auch mit einer mehr oder weniger dicken Sielhaut (bestehend vornehmlich aus Bakterienrasen) beziehen, die den Wärmeübergang hemmen. In früheren Jahren wurden diese Ablagerungen mühsam mittels chemischer Stoffe (fast ausschließlich Säuren mit Zusätzen) beseitigt. Die Reinigung der Rohre ist nunmehr mittels Plastikkugeln vereinfacht, die mit dem Kühlwasser die Rohre durchwandern und den Belag gleichsam abstreifen. Es ist aber auch zu bedenken, daß durch Fehlsteuerungen im Enzymstoffwechsel der Zelle eine irreversible Schädigung auch in Temperaturbereichen unterhalb der Eiweißdenaturierung möglich ist. Vegetative Formen werden bei Überschreiten ihrer Maximaltemperaturen in Relation zur Expositionszeit absterben. D. h., je größer die Differenz zwischen Übertemperatur und Maximaltemperatur ist, desto kleiner wird die Expositionszeit (LZ 50), bei der die Hälfte der Organismen noch überlebt. Bei vorgegebener Expositionszeit nimmt die Zahl der vegetativen Formen mit steigender Temperatur exponentiell ab. Die höchsten Kühlwassertemperaturen von 45 °C, die im Jahresverlauf selten gegeben sind, und die kurze Expositionszeit von wenigen Minuten reichen für eine allgemeine Abtötung des Planktons nicht aus. Die Mehrheit der Organismen bleibt am Leben. Empfindliche Arten können in ihrer Aktivität gehemmt oder auch geschädigt werden. Hierzu mag eine mehrmalige Wiederholung des Temperaturwechsels beitragen. Der thermische Einfluß, dem das Plankton unterworfen ist, ist nur ein Aspekt der Belastung.

Unter den vorstehend aufgeführten Gesichtspunkten ist die Limitierung der Temperatur für das Kühlwasser im Kondensator gegenwärtig nicht erforderlich.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß Kühlturm und Kühlkreislauf Biotop mit einer selektierten Lebensgemeinschaft sind.

5. Einsatz von Bioziden im Kühlkreislauf

Das Kühlturmsatzwasser enthält fast stets Nährstoffe für Mikroorganismen, die diesem Nahrungsangebot entsprechend in Abhängigkeit von den jeweiligen hydrologischen Gegebenheiten in mehr oder weniger großer Zahl bereits im zu nutzenden Wasser enthalten sind. Hierbei spielen sessile Formen für das Kühlsystem eine besondere Rolle, weil sie an den Flächen innerhalb des Systems aufwachsen und den Wärmeübergang, den Kühleffekt schlechthin, behindern können. Andererseits sind mehrere Arten auf Grund ihrer Stoffwechselfvorgänge in der Lage, Korrosionen an Werkstoffen herbeizuführen, wie dies auch von mannigfachen Beobachtungen, insbesondere von Algen, in der unbeeinflussten Umwelt bekannt ist. So werden nicht nur Holz und Eisen, sondern auch Aluminium durch mikrobielle Einflüsse oft geschädigt, wenn nicht entsprechende Schutzanstriche aufgebracht oder die Werkstoffe imprägniert oder in anderer Weise z. B. Eloxieren geschützt werden. Der mikrobielle Angriff (Korrosion) von Aluminium wird durch organische Säuren und Sulfide verursacht, die von bestimmten Bakterienarten produziert werden (z. B. Cladosporium und Desulfovibrio).

Die Betreiber von Kraftwerken haben ein besonderes Interesse daran, daß durch Mikrobewuchs innerhalb des Kühlsystems

- der Wärmeübergang nicht übermäßig behindert wird
- Korrosionen der Werkstoffe weitestgehend ausgeschlossen werden können.

Während die Probleme im Kondensator durch mechanische Reinigungsverfahren (Einsatz von Plastik- oder Korundgummikugeln -Taprogge-Anlage -) wohl als gelöst anzusehen sind und nur gelegentlich bei Abschaltungen eine chemische Reinigung durchgeführt werden dürfte, ist die Reinigung der Nebenkühlsysteme, der Kühltürme, aber auch der Rohrsysteme bei der Durchlaufkühlung aus wasserwirtschaftlicher Sicht nicht unproblematisch, weil mechanische Reinigungsverfahren, wie Erhöhung der Fließgeschwindigkeit und Bürstenreinigung oftmals wirkungslos bleiben, so daß mit chemischen Produkten (Mikrobiozide) dem Bewuchs begegnet werden muß.

Mikrobiozide gliedern sich in zwei Typen: Oxidierende und nicht oxidierende, die entweder allein oder kombiniert eingesetzt werden.

Nachstehend sind die gebräuchlichsten Mikrobiozide aufgeführt:

- Chlor
- Chlorierte Phenole
- Organische Schwefel-, Brom- und Chlorverbindungen
- Organometallverbindungen
- Quarternäre Ammoniumverbindungen

Diese untergliedern sich wiederum in zwei Typen:

1. Kontinuierlich anzuwendende Mikrobiozide
2. Diskontinuierlich anzuwendende Mikrobiozide

Zu den in der Regel kontinuierlich anzuwendenden Mikrobioziden zählen die nichtoxidierenden Biozide.

Chlorierte Phenole werden häufig zusammen mit Dispergierungsmitteln eingesetzt. Sie haben eine gute algizide und fungizide Wirkung.

Amine und quarternäre Ammoniumverbindungen sind vornehmlich gegen sporenbildende Bakterien wirksam. Zusammen mit Reinigungs- und Dispergierungsmitteln werden auch Schleime im laufenden Betrieb entfernt.

Organische Schwefel-, Brom- und Chlorverbindungen finden gezielt gegen aerobe schleimbildende Bakterien Anwendung. Diese Substanzen enthalten Dispergierungs- und Penetriermittel. Die gemeinsame Anwendung eines Biozids mit einem oberflächenaktiven Stoff erhöht die Toxizität um ein Vielfaches, da mehr Biozidmoleküle die Zellmembran angreifen können.

Die Wirkung der Biozide ist sehr unterschiedlich. Durchdringen diese Substanzen die Zellmembran, so können sie den Enzymstoffwechsel empfindlich stören, indem sie einzelne Enzyme blockieren. Die Zelle ist dann durch die Hemmung von Synthese- oder Abbauwegen in ihrer Lebensfähigkeit stark beeinträchtigt. So interferieren beispielsweise organische Schwefelverbindungen mit den Cytochromoxidasen, den Enzymen der Atmungskette. Andere Biozide treten, da sie einen ähnlichen chemischen Aufbau wie bestimmte Zellstrukturen haben, zu diesen in Konkurrenz und stören dadurch den Stoffwechsel. Die Wirkung einiger Substanzen beruht beispielsweise auf einer Zerstörung der Membranstruktur. Die Membranen werden „undicht“, und die Zelle lysiert.

Chlorierte Phenole koagulieren das Zelleiweiß, wodurch die Zellen absterben.

Die Wirksamkeit der üblicherweise diskontinuierlich anzuwendenden stark oxidierenden Substanzen beruht auf der Oxidation der Sulfhydrylgruppen, die hauptsächlich bei den schwefelhaltigen Aminosäuren vorkommen (die Aminosäuren selbst stellen die Grundbausteine des Eiweißes dar).

Es wird nicht verkannt, daß aus betriebstechnischen und betriebswirtschaftlichen Gründen eine Beseitigung des Bewuchses in den Kühlsystemen stattfinden muß, wobei sich alle Bekämpfungsmaßnahmen gegen lebende Organismen (Bakterien, Pilze, Algen, Protozoen) richten. Wenn man aber einerseits die Kühltürme als eigenen Biotop und als bedeutsamen Faktor im Rahmen des Gewässerschutzes im Hinblick auf die Beseitigung organischer Inhaltsstoffe des Vorflutwassers herausstellt, darf man andererseits durch den kontinuierlichen Einsatz von Mikrobioziden diesen offensichtlichen Vorteil, der mit der Sauerstoffanreicherung gleichrangig zu betrachten ist, nicht in Frage stellen. Sogenannte Verdünnungseffekte im Vorflutwasser nach Einleitung des kontinuierlich mit Mikrobioziden behandelten Kühlwassers sind bei dieser Betrachtungsweise indiskutabel.

Für die diskontinuierliche Behandlung mit Chlor sprechen neben den gesammelten Erfahrungen die daraus resultierenden Tatsachen, daß sich nicht wenige Organismen an Chlor adaptieren können und demnach zur Bewuchsbekämpfung immer höhere Chlorkonzentrationen angewandt werden müßten. Andererseits ist das Chloren von Oberflächenwasser wegen der Bildung toxischer, karzinogener organischer Chlorverbindungen abzulehnen, weil sie über den Vorfluter der Trinkwassergewinnung zugeführt werden. Die Bildung von organischen Chlorverbindungen nimmt mit dem Gehalt an organischem Kohlenstoff im Wasser, mit der Temperatur, der Belichtung und der Chlorkonzentration zu.

Wegen ähnlich toxischer Eigenschaften bilden auch die anderen aufgeführten Biozide eine Gefahr für die Gewässer.

IV. Kapitel

Grundlagen für die Berechnung der Temperatur eines Gewässers

1. Die Theorie des Wärmehaushaltes von Gewässern

1.1 Die Wärmeleistungsbilanz eines Flußabschnittes

Wärme ist eine Form der Energie, Berechnungen des Wärmehaushaltes werden deshalb aus Energiebetrachtungen abgeleitet (19).

Einem als Bilanzgebiet dargestellten Flußabschnitt (Abb. 18) werden pro Kilogramm des eintretenden Wassers folgende Energiebeträge zugeführt:

- die innere Energie u_1
- die Einschubarbeit (Druck mal spez. Volumen) $(p/\rho)_1$
- die kinetische Energie $v_1^2/2$
- die potentielle Energie gz_1

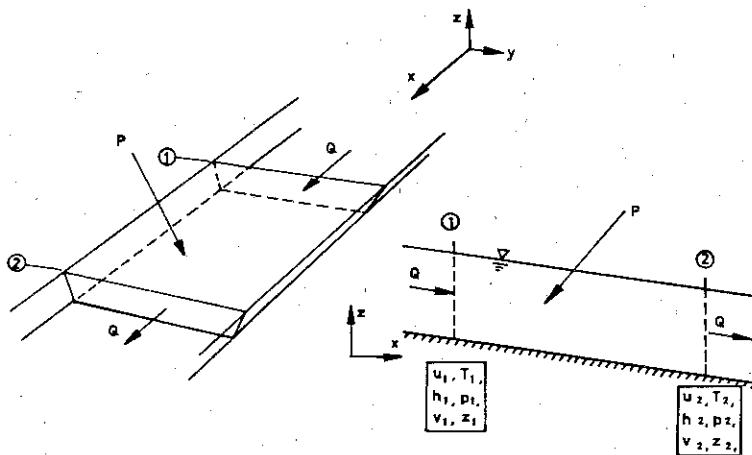


Abb. 18: Schematisierter Abschnitt eines Fließgewässers (19)

Die einzelnen Werte seien über den Querschnitt gemittelt. Faßt man die beiden ersten Summanden zur Enthalpie $h_1 = u_1 + (p/\rho)_1$ zusammen und multipliziert die Summe aller Teilenergien mit dem Massenstrom $Q \cdot \rho$, so erhält man die durch den Eintrittsquerschnitt insgesamt zuströmende Leistung. Unter der Voraussetzung eines kontinuierlichen Abflusses ($\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2$) ergeben sich ganz analog die Leistungsbeträge, die mit $Q \cdot \rho$ beim Querschnitt 2 austreten. Dazu kommen auf der positiven Seite der Bilanzen eventuell zugeführte Wärmeströme Φ und mechanische Leistungen A (zum Beispiel, allerdings mit negativem Vorzeichen, die Leistung einer Turbine). Dann lautet die Bilanzgleichung

$$Q \rho \left(h_1 + \frac{v_1^2}{2} + gz_1 \right) + \Phi + \dot{A} = Q \rho \left(h_2 + \frac{v_2^2}{2} + gz_2 \right) \quad (1)$$

Bezeichnet man die Differenz zwischen den Querschnitten 1 und 2 mit Δ , also z. B.

$\Delta z = z_2 - z_1$, dann ergibt sich

$$Q \rho \Delta h + Q \rho \frac{\Delta v^2}{2} + Q \rho g \Delta z = \Phi + \dot{A} \quad (2)$$

Diese Gleichung entspricht für $\Phi + \dot{A} = 0$ und bei vernachlässigbarer Temperaturänderung (d. h. $\Delta u = 0$ und damit $\Delta h = \Delta p/\rho$) der Bernoulli-Gleichung.

Führt man anstelle von $Q \cdot \rho \cdot \Delta h$ den Enthalpiestrom $\Delta \dot{H}$ ein, nimmt man ferner gleichförmigen Abfluß an, so daß das Geschwindigkeitsglied verschwindet, und faßt man die Änderung der potentiellen Energie mit $\Phi + \dot{A}$ zusammen:

$$\Phi + \dot{A} - Q \rho g \Delta z = P \quad (3)$$

dann erhält man

$$\Delta \dot{H} = P \quad (4)$$

Mit der für isobare Vorgänge gültigen Beziehung

$$\Delta \dot{H} = V \rho c_p \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (5)$$

ergibt sich daraus

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{1}{\rho c_p} \frac{P}{V} \quad (6)$$

Bezeichnet man P/V als die von x und t abhängige raumspezifische Leistungsänderung $P_s(x, t)$ z. B. in W/m^3 , so erhält man mit $\Delta T = T(x, t) - T(x=0, t=0)$ und $\Delta t = x/v(x, t)$ die Funktion für den Temperaturlängsschnitt eines fließenden Gewässers:

$$T(x, t) = T(x=0, t=0) + \frac{1}{\rho c} \frac{P_s(x, t)}{v(x, t)} x \quad (7)$$

Als Wärmehaushaltsgleichung kann Gl. 6 mit $V/\Delta t = Q$ in der Form

$$Q \rho c \cdot \Delta T = P \text{ in W oder in J/s} \quad (8)$$

geschrieben werden. Damit ist ausgedrückt, daß die Änderung $Q \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta T$ des Wärmehaushaltes eines fließenden Gewässers gleich der Bilanz P von Wärmezufuhr und Wärmeabgabe ist.

In Gl. (8) bedeuten

1. Q = Abfluß in cm^3/s oder m^3/s
2. ρ = Dichte des Wassers = 1 g/cm^3 oder 1 t/m^3
3. c = spezifische Wärme des Wassers = $4,2 \text{ J/g K}$ oder $4,2 \text{ MJ/tK}$ (1 cal/g grad)
4. Δt = Temperaturänderung in K
5. P = Wärmeleistungsbilanz = ausgetauschter Wärmestrom in J/s oder MJ/s

Eine homotherme Wassersäule mit einer Oberfläche von $F = 1 \text{ cm}^2$ und einer Säulenhöhe von $h \text{ cm}$ (= Gewässertiefe) erfährt demnach innerhalb des Zeitintervalls Δt Stunden durch den Wärmeübergang über die Oberfläche folgende Temperaturänderung

$$\Delta T = \frac{1}{c \cdot \rho \cdot h \cdot F} \cdot P \cdot \Delta t \quad (9)$$

Geht $\Delta t \rightarrow 0$, dann folgt

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{c \cdot \rho \cdot h \cdot F} \cdot P \quad (10)$$

Wäre die Wärmebilanz P als Funktion der Zeit bekannt, so ließe sich mit der Differentialgleichung 10 die Temperatur, die sich in der betrachteten Wassersäule einstellt, in Abhängigkeit von der Zeit errechnen. Dabei ist zu beachten, daß sich das örtliche Bezugssystem mit der Wassersäule, d. h. mit der fließenden Welle, fortbewegt.

Die einzelnen Komponenten der Wärmebilanz sind aus meteorologischen Meßwerten wie Strahlung, Luftfeuchtigkeit, Lufttemperatur und dergleichen zu bestimmen. Eine geschlossene mathematische Darstellung dieser Komponenten ist im allgemeinen nicht möglich. Dies führt andererseits dazu, daß Gleichung 10 nicht geschlossen integriert werden kann. Die praktische Berechnung geht daher von der Beziehung 9 aus und bedient sich des Differenzenverfahrens zur Lösung des Problems. Auf Einzelheiten wird in Kap. V 2. eingegangen.

Nachfolgend werden zunächst die einzelnen Komponenten der Wärmebilanz einer näheren Betrachtung unterzogen.

1.2 Die einzelnen Komponenten der Wärmebilanz (Wärmequellen und Wärmesenken)

1.2.1 Übersicht

Die Bilanz P des Wärmehaushaltes ergibt sich im wesentlichen aus folgenden Komponenten:

- direkt eingetragene Wärme Φ_Q (Nebenflüsse und -bäche, Einleitungen, Grundwasserzuflüsse und Versickerungen)
- Strahlungswärme Φ_{SB}
- Verdunstungs- oder Kondensationswärme Φ_v
- Konvektionswärme Φ_L
- Änderung des Aggregatzustandes durch Gefrieren oder Schmelzen von Eis (Sonderfall: bleibt bei Wärmelastrechnungen für Sommer und Herbst außer Ansatz)

Der Wärmeübergang vom und zum Gewässerbett ist zu vernachlässigen. Alle übrigen Komponenten, wie

- mechanische Arbeit (Pumpen, Schiffsmotoren, Wasserkraftwerke),
- verteilte Zu- und Abflüsse (direkte Niederschläge Oberflächenzufluß),

- chemische Reaktionen und biologische Abbauprozesse,
- innere Reibung

sind im einzelnen meist von geringer Größenordnung.

Die Wärmebilanz eines Gewässers ist die Summe der einzelnen obengenannten Wärmeaustauschvorgänge. Als Gleichung läßt sich dies wie folgt ausdrücken:

$$P = \Phi = \Phi_Q + \Phi_{SB} + \Phi_V + \Phi_L \quad (11)$$

Hierbei sind die einzelnen Summanden positiv, wenn sie eine Temperaturerhöhung, negativ, wenn sie eine Temperaturniedrigung des Gewässers bewirken.

Die Werte Φ_{SB} , Φ_V und Φ_L in Gleichung 11 können sich sowohl mit dem Ort als auch mit der Zeit ändern. Sie bewirken eine stetige Temperaturänderung des Gewässers. Der direkte Wärmeeintrag Φ_Q durch eine Kühlwassereinleitung hingegen erzeugt einen Temperatursprung. Φ_Q ist daher in der Wärmebilanzbetrachtung an der jeweiligen Einleitungsstelle gesondert zu berücksichtigen.

Φ_{SB} , Φ_V und Φ_L sind Wärmeströme, die über die Oberfläche des Gewässers ausgetauscht werden. Werden diese Wärmeströme auf die Oberfläche 1 und auf die Zeiteinheit 1 bezogen, so erhält man

$$\varphi = \varphi_{SB} + \varphi_V + \varphi_L \quad (12)$$

Es bedeuten

- φ = Gesamtwärmestromdichte in $J/cm^2 s$
- φ_{SB} = Wärmestromdichte aus Strahlung in $J/cm^2 s$
- φ_V = Wärmestromdichte aus Verdunstung oder Kondensation in $J/cm^2 s$
- φ_L = Wärmestromdichte aus Konvektion in $J/cm^2 s$

1.2.2 Direkt eingetragene Wärme

Mit dem Zufluß aus Seitengewässern und Grundwasser sowie der Einleitung von Kühlwasser und Abflutwasser wird Wärme direkt in den Vorfluter eingetragen. Sie wird als Wärmeleistung Φ_Q nach Abschnitt IV 1.2.1. behandelt. Nach Abb. 19 ergibt sich dafür

$$\Phi_{G2} = \Phi_{G1} + \Phi_E \quad (13)$$

$$T_{G2} = T_{G1} + \Delta T_E \frac{Q_E}{Q_{G2}} \quad \text{für } Q_E \ll Q_{G2} \quad (14)$$

Für die Berechnung wird ein homothermer Wasserkörper angenommen, in dem alle Temperaturen Mittelwerte des betrachteten Querschnittes darstellen. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, daß je nach Art des Fließvorganges im Vorfluter Zonen wärmeren Wassers und Schichtenbildung auftreten können (Kapitel II 1.3.1.).

Je nach ihrer Temperatur führen Seitengewässer zur Erwärmung oder Abkühlung des Vorfluters. Der Einfluß von künstlichen Erwärmungen ist in ΔT_E zu berücksichtigen. Schwankende Abflüsse oder Temperaturen des Seitengewässers können zu Berechnungen für mehrere Lastfälle führen.

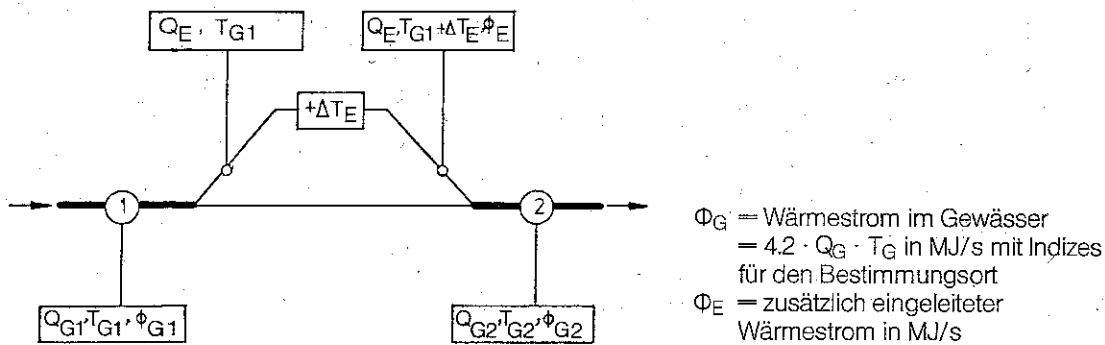


Abb. 19: Schema der Wasserentnahme und -wiedereinleitung

1.2.3 Die Strahlungsbilanz

1.2.3.1 Übersicht

Ist I die direkte Sonnenstrahlung,
 H die diffuse Himmelsstrahlung,
 R die an der Wasseroberfläche reflektierte Strahlung,
 G die atmosphärische Gegenstrahlung,
 A die Wärmeabstrahlung der Wasseroberfläche,
 so ist die Strahlungsbilanz

$$\Phi_{SB} = I + H + G - R - A \quad (15)$$

Die Summe I + H bezeichnet man als Globalstrahlung. Die Differenz G-A wird gesondert betrachtet und hier als Wärmestrahlungsbilanz bezeichnet.

Die Größen I, H und G werden durch Sonnenstand, Bewölkung, Wasserdampfgehalt, Temperaturverteilung, Trübung der Atmosphäre und Horizontabschirmung beeinflusst. Sie umfassen kurzwellige Strahlung von 0,3 bis 4 μm . Die Größen G und A umfassen die langwellige Wärmestrahlung von 4 bis 100 μm .

Um die Wechselwirkung einer Wasseroberfläche mit den einzelnen Komponenten der Strahlungsbilanz zu verstehen, muß man zunächst die optischen Eigenschaften des Wassers betrachten.

Ein „Schwarzer Körper“ absorbiert definitionsgemäß alle einfallende Licht- und Wärmestrahlung restlos und emittiert eine Strahlung, die nach Temperaturabhängigkeit und spektraler Zusammensetzung dem Planck'schen Strahlungsgesetz gehorcht.

Im interessierenden Temperaturbereich von 0 bis 30 °C hat die Planck'sche Kurve ihr Maximum bei 10 μm und fällt bei 4 μm und bei 40 μm auf 5 % des Maximalwertes ab.

Die Richtungsabhängigkeit des Absorptions- und Emissionsvermögens einer ideal schwarzen Fläche folgt dem Lambert'schen Gesetz und zeigt eine starke Bevorzugung der vertikalen Winkelbereiche und eine Vernachlässigung der Horizontalen. Eine Wasseroberfläche ist für den Bereich der Wärmestrahlung ein fast perfekter schwarzer Körper mit folgender Abweichung: Senkrecht einfallende Strahlung wird zu 2 % reflektiert, unter 45° einfallende zu 5 % und unter

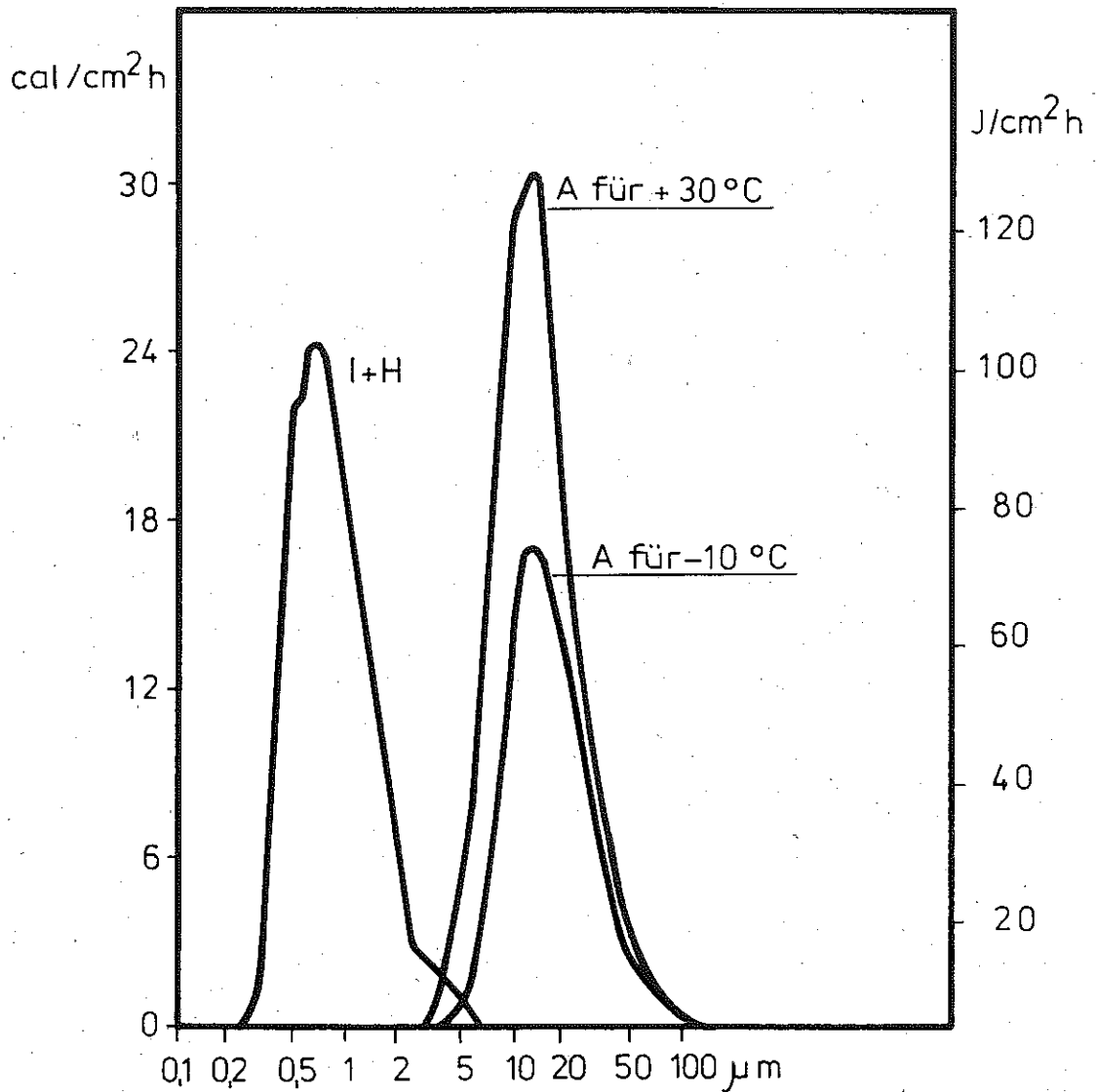


Abb. 20: Spektrale Verteilung der Globalstrahlung I + H und der Strahlung A eines schwarzen Körpers bei -10 und 30°C

80° gegen die Senkrechte einfallende Strahlung zu 40 %. Das Absorptions- und Emissionsvermögen ist dementsprechend 98 % für die Senkrechte und 95 % bzw. 60 % für 45° und 80° . Im sichtbaren Bereich ist das Reflexionsvermögen etwas höher, mit etwa der gleichen Winkelabhängigkeit. Der Strahlungsaustausch erfolgt im Wärmestrahlungsbereich aus der obersten Haut des Wassers, aus einer ca. $\frac{1}{100}$ Millimeter dicken Schicht. Auch $\frac{1}{3}$ der Globalstrahlung von $1,5 \mu\text{m}$ bis $4 \mu\text{m}$ wird in dieser Haut absorbiert. Hingegen kann die Eindringtiefe des sichtbaren Lichtes und des nahen Infrarot bis $1,5 \mu\text{m}$ (d. h. $\frac{2}{3}$ der Globalstrahlung) in Wasser einige Dezimeter bis Meter betragen. Deshalb kommt (im Unterschied zum Wärmestrahlungsbereich) noch eine Rückstreuung des eingestrahlteten Lichtes durch Schwebstoffe und ggf. durch das Flußbett zustande, die 20 % erreichen kann.

Ein weiterer Faktor, der bei der Erfassung der Strahlungsbilanz zu beachten ist, ist die Horizontabschirmung. Bei dieser Betrachtung kann davon ausgegangen werden, daß der Winkel, unter dem der obere Rand der Berge entlang den Ufern von der Flußmitte aus erscheint,

nur in ganz seltenen Fällen 30° erreicht oder gar überschreitet. Wie später noch gezeigt wird (vgl. Tab. S. 86) beträgt der Wärmestrahlungsaustausch eines schwarzen Körpers bei einer Horizontabschirmung von 30° immer noch 90 % desjenigen bei nicht abgeschirmtem Horizont. Außerdem geht aus den vorstehenden Ausführungen hervor, daß das Absorptions- und Emissionsvermögen einer Wasseroberfläche für 10° gegen die Horizontale nur noch 60 % dessen eines schwarzen Körpers beträgt. Hieraus läßt sich schließen, daß die Wirkung der bei den Flüssen zu beachtenden Horizontabschirmung bezüglich der Wärmestrahlungsbilanz kleiner als 7 % ist. Da auch bei der Globalstrahlung die Strahlungsdichte bei geschlossener Wolkendecke vom Zenit zum Horizont stark abnimmt, wird auch hier der Einfluß der Abschirmung unter 10 % bleiben. Bei klarem Himmel kann jedoch vor allem im Winter durch Horizontabschirmung die Sonnenscheindauer erheblich herabgesetzt werden.

1.2.3.2 Die Globalstrahlung (direkte Sonnenstrahlung und diffuse Himmelsstrahlung)

Unter Globalstrahlung $I + H$ versteht man die von der Sonne herrührende Strahlung in der Form, wie sie nach dem Durchdringen der Atmosphäre an der Erdoberfläche ankommt. Sie setzt sich zusammen aus der direkten Sonnenstrahlung und der diffusen Himmelsstrahlung. Ihr Spektrum reicht von ca. $0,2-4\mu\text{m}$ mit einem Maximum, das bei klarem Wetter bei $0,6\mu\text{m}$ liegt und bei Bewölkung zu kürzeren Wellen verschoben ist. Durch Wolken wird die Globalstrahlung im Mittel auf $\frac{1}{4}$ geschwächt, wobei die Werte zwischen $\frac{1}{8}$ und $\frac{4}{5}$ schwanken. Bei gleichmäßiger Bewölkung nimmt die Strahlungsdichte zum Horizont hin ab. Für einen Zenitwinkel von 75° , also 15° über dem Horizont, ist die Leuchtdichte halb so groß wie im Zenit.

Die Globalstrahlung wird an einigen Stationen des Deutschen Wetterdienstes gemessen, davon ununterbrochen seit 1957 in Hamburg-Fuhlsbüttel, Braunschweig-Völkenrode, Trier-Petrisberg, Würzburg-Stein und Hohenpeißenberg. Die an diesen Stationen gewonnenen Meßergebnisse können jedoch nicht ohne weiteres auf die Oberfläche der Gewässer übertragen werden.

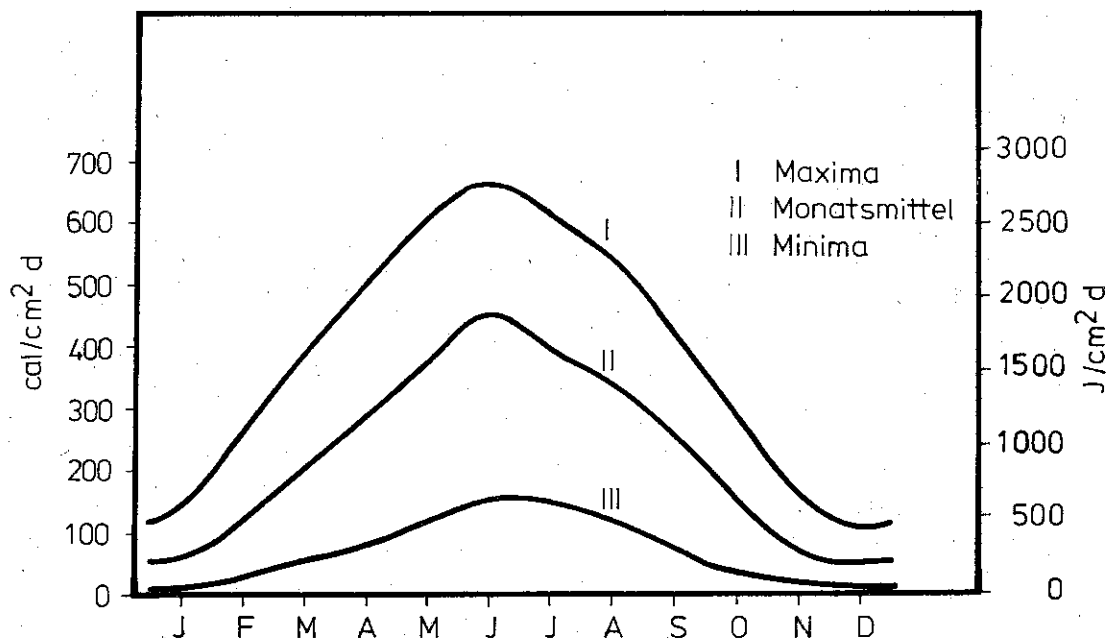


Abb. 21: Jahresgang der Globalstrahlung, Tagessummen, gemittelt über die Jahre 1961 – 65 und über die Stationen Hamburg, Braunschweig und Würzburg-Stein

Aus Abb. 21 ersieht man, daß im 5jährigen Monatsmittel die Globalstrahlung im Juni neunmal so groß ist, wie im Dezember. Die Maximal- und Minimaltagessummen (jeweils gemittelt über 3 Stationen und 5 Jahre = 15 Werte) verhalten sich im Sommer wie 4,5 : 1, im Winter wie 10 : 1.

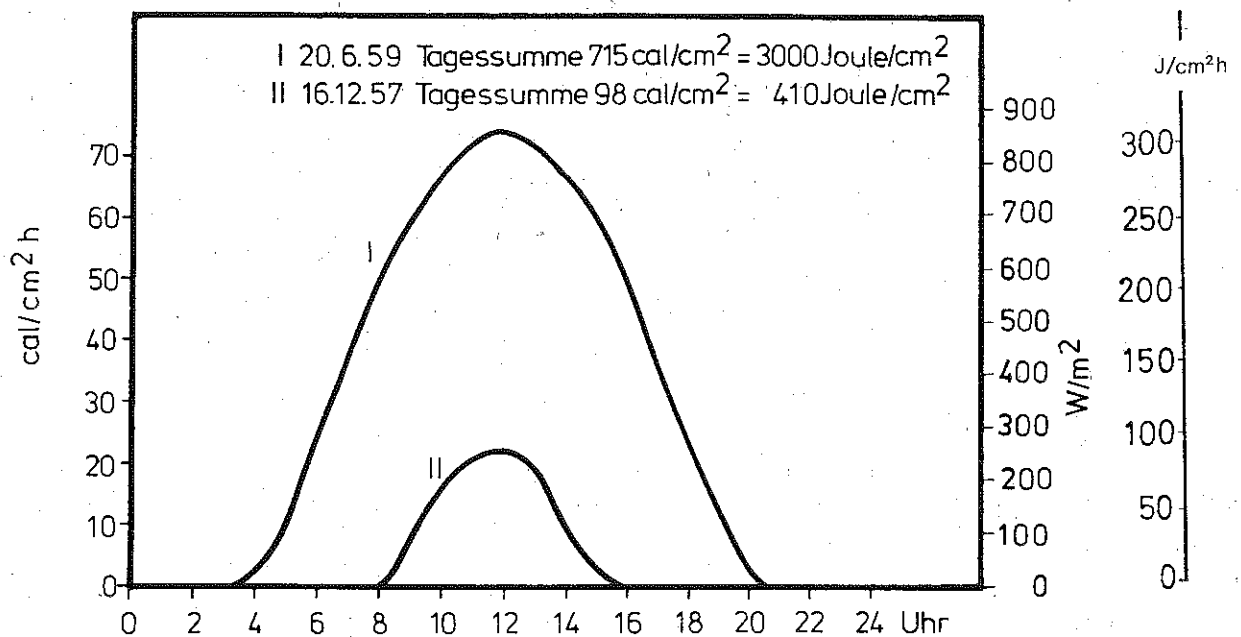


Abb. 22: Tagesgang der Globalstrahlung an extrem klaren Tagen

Wie sich der Zenitwinkel der Sonne und die im Jahreslauf sich ändernde Sonnenscheindauer auf den Tagesverlauf der Globalstrahlung auswirkt, ist in Abb. 8 dargestellt an Hand der strahlungsreichsten Tage in Hamburg in den Monaten Juni und Dezember der Jahre 1957-1959.

Das Wechselspiel von Einstrahlung bei Tag und Abstrahlung bei Nacht hat auch bei gleichbleibenden Wetterbedingungen einen Tagesgang der Wassertemperatur zur Folge. Die Höhe der Tagestemperaturamplitude läßt sich ermitteln aus der Einstrahlung und der Tiefe des Flusses. Ist E die Tagessumme der Sonneneinstrahlung in J/cm² und h die Tiefe des Flusses in cm und D das mittlere Reflektionsvermögen (7 % $\hat{=}$ 0,07) der Wasserfläche, so beträgt die Aufwärmung im Laufe des Tages (brutto)

$$\Delta T = \frac{E(1-D) \cdot 0,239}{h}$$

E kann z. B. aus Abb. 21 entnommen werden (Juni: E = 2800 J/cm² · d). Im Sommer kann also die Temperatur eines 3 m tiefen Flusses allein durch die Globalstrahlung über Tag maximal um 2 K steigen bzw. die Abkühlung um 2 K verringert werden.

Die rein rechnerische Erfassung der Globalstrahlung stößt auf viele Schwierigkeiten. Die von der Sonne auf ein horizontales Stück der Erdoberfläche geschickte Strahlung läßt sich aus der Solarkonstanten und dem Zenitwinkel berechnen. Der Tagesverlauf des Zenitwinkels ergibt sich aus astronomischen Daten. Aber auch bei wolkenlosem Himmel wird ein Teil der Sonnenstrahlung durch die Trübung und den Wasserdampfgehalt der Luft gestreut bzw. absorbiert. Es gibt Formeln, die die bei klarem Himmel am Boden eintreffende Globalstrahlung in Beziehung setzen zu den Kenngrößen der verschiedenen Einflüsse. Solche Berechnungen erfassen aber nur

die ca. 15 klaren Tage im Jahr. Die unter einem bewölkten Himmel anzutreffende Globalstrahlung hängt von Bedeckungsgrad, Mächtigkeit, Dichte und Tröpfchengröße der Wolken und der Rückstreuung sichtbaren Lichts vom Erdboden (Albedo) ab. Der Beobachtung vom Erdboden aus sind nur Bedeckungsgrad und Wolkenart zugänglich. Eine Berechnung der Globalstrahlung aus anderen Beobachtungsgrößen ist also praktisch unmöglich.

Man ist daher auf die direkten Messungen angewiesen, die verhältnismäßig einfach mit den Geräten nach Moll-Gorczyński oder Robitzsch zu erhalten sind. Die Meßgeräte arbeiten nach folgendem Prinzip: Ein geschwärztes Plättchen wird durch die Globalstrahlung aufgewärmt. Ein gleichartiges Plättchen ist weiß angestrichen, so daß es die Globalstrahlung zurückwirft und nicht erwärmt wird. Die Umgebungstemperatur beeinflusst die Plättchen in gleichem Maße, so daß ihr Einfluß eben durch die Verwendung der zwei verschieden angestrichenen Plättchen eliminiert wird. Der Temperaturunterschied zwischen beiden Plättchen ist ein Maß für die Intensität der Globalstrahlung. Dieser Temperaturunterschied wird mit Thermoelementen (Moll-Gorczyński) gemessen. Bei dem Gerät nach Robitzsch sind die beiden Flächen als Bimetallstreifen ausgeführt, die direkt eine Schreibfeder bewegen. Damit der Wind nicht die Plättchen kühlt und dadurch die Temperaturdifferenz herabsetzt, wird die Anordnung mit einer Glashaube abgedeckt.

1.2.3.3. Die Wärmestrahlungsbilanz

Wie schon eingangs erwähnt wurde, wird unter Wärmestrahlungsbilanz die Differenz zwischen der Ausstrahlung des Wassers A und der atmosphärischen Gegenstrahlung G, also G-A verstanden.

Die Ausstrahlung der Wasserfläche A berechnet sich unter Annahme eines Emissionsvermögens von 97 % zu

$$A = 0,97 \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (16)$$

Hierbei ist

– T die absolute Temperatur in Kelvin, $T = t [^{\circ}\text{C}] + 273$ und

– σ die Strahlungskonstante des schwarzen Körpers

(Stefan-Boltzmann-Konstante $5,7 \cdot 10^{-12} \text{ J/cm}^2 \text{ K}^4$)

Diese Ausstrahlung wird größtenteils kompensiert durch die Gegenstrahlung der Atmosphäre. Kohlensäure, Wasserdampf und Ozon haben eine Reihe von Spektralbereichen, in denen sie die ankommende Strahlung absorbieren, und entsprechend der Temperatur der Luftschicht, in der sie sich befinden, Strahlung emittieren. Diese Banden überdecken mehr oder weniger den ganzen Bereich der Wärmestrahlung von 4–40 μm mit Ausnahme des „atmosphärischen Fensters“ von etwa 8–12 μm . Wolken emittieren Wärmestrahlung mit der Temperatur ihrer Untergrenze. Die Gegenstrahlung hängt also von der Lufttemperatur in verschiedenen Höhen, von der Wolkenhöhe und Bedeckung und vom sehr erheblich schwankenden Wasserdampfgehalt der Luft ab.

Vom Zenit zum Horizont nimmt die Gegenstrahlung zu, weil die Strahlung, je flacher sie einfällt, aus einer um so dickeren und um so niedrigeren und darum meist wärmeren und wasserdampfreicheren Luftschicht kommt.

Dem überlagert sich die Winkelabhängigkeit (Lambertsches Gesetz $A = A_0 \cdot \cos \varphi$) mit der die fast „schwarze“ Wasserfläche ihren Strahlungsaustausch vollzieht. Das Lambertsche Gesetz besagt, daß das Strahlungsaufnahme- und Abgabevermögen in der Senkrechten am stärksten ist und zum Horizont hin auf 0 abnimmt, weil die schwarze Fläche, von der Kante her gesehen, zu einem Strich zusammengeschrumpft erscheint.

Praktisch ergibt sich daraus für die Winkelabhängigkeit der Wärmestrahlungsbilanz, daß im Winkelbereich vom Zenit (90°) bis 35° über dem Horizont 67 % des Strahlungsaustausches erfolgt; im Bereich vom Zenit bis 20° über dem Horizont 90 %. Für noch flachere Winkel nimmt der Strahlungsaustausch rapide ab bis auf 0 für die Horizontale.

Durch Berge oder Bäume ergibt sich eine Abschirmung des Strahlungsaustausches. Am Grunde eines gerade verlaufenden Tales ist deshalb die Strahlungsbilanz verringert gemäß Tabelle.

Ebene										Schlucht
b:	0°	5°	10°	15°	20°	30°	45°	60°	75°	90°
A-G:	100	99	98	98	96	90	75	54	28	0 %

Wärmestrahlungsbilanz am Grunde eines geraden V-Tales in Abhängigkeit vom Böschungswinkel b

Diese Tabelle gilt für kleine Täler. Für große Täler, z. B. das Rheintal, ist der Abschirmungseffekt geringer, weil zwischen der Wasserfläche und dem Berg schon große Luftmassen liegen. Auch Nebel, die häufig über den Flüssen auftreten, können die Strahlungsbilanz erheblich beeinflussen. Z. B. kann die Ausstrahlung infolge Nebel von 120 W/m^2 bis auf 0 zurückgehen.

Die Wärmestrahlungsbilanz kann in bezug auf eine Fläche mit festliegender Temperatur, z. B. eine Wasserfläche angegeben werden. Die Wärmeabgabe durch Ausstrahlung, die die Gegenstrahlung überwiegt, beträgt in klaren Nächten ca. 120 J/s m^2 .

Die Wärmestrahlungsbilanz ist fast immer negativ. Positiv kann sie erst werden, wenn die Luft um mehr als 15 K wärmer ist als das Wasser. Die Wärmestrahlungsbilanz ist eine kleine Differenz zwischen großen Beträgen. Im Jahresmittel ist (in Hamburg) die Gegenstrahlung um 11 % kleiner als die Wärmeabstrahlung. Dieses annähernde Gleichgewicht zwischen Wärmeabstrahlung des Wassers und Gegenstrahlung der Atmosphäre ist nur insoweit von der Tageszeit abhängig, als sich die Wassertemperatur, der Wasserdampfgehalt der Luft und die Lufttemperatur ändern.

Die Gegenstrahlung G stammt zum Teil von Wasserdampf und Kohlensäure aus Höhen bis zu mehreren 100 Metern. Für die Berechnung müßte der vertikale Verlauf von Luftfeuchte und Temperatur bekannt sein. Da diese Größen außer durch Radiosondenaufstiege nicht zu messen sind, muß man sich an empirische Formeln halten, die die für höhere Schichten geltenden Werte aus den am Boden gemessenen Werten extrapolieren. Für wolkenlosen Himmel werden für die Gegenstrahlung folgende Beziehungen angegeben:

$$\text{Von ANGSTRÖM: } G = \sigma T^4 (0,848 - 0,294 \cdot 10^{-0,030 \kappa \cdot \rho}), \quad (17)$$

$$\text{Von BRUNT: } G = \sigma T^4 (0,543 + 0,050 \sqrt{\kappa \cdot \rho})$$

Wird G in $J/s \text{ m}^2$ gewünscht, so ist die Stefan-Boltzmann-Konstante einzusetzen als $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ J/s m}^2 \text{ K}^4$.

ρ ist die Dampfdichte in Gramm Wasser/ m^3 2 m über der Wasseroberfläche. Wird der Wasserdampfgehalt durch den Dampfdruck in mbar ausgedrückt, so ist umzurechnen

$$\rho \text{ (g/m}^3\text{)} = K(t) \cdot e \text{ (mbar)} \quad \begin{array}{l} K(t) = \text{Korrelations-Faktor} \\ e = \text{Dampfdruck} \end{array}$$

Für $0 \text{ }^\circ\text{C}$: $K(t) = 0,795$, für $15 \text{ }^\circ\text{C}$: $K(t) = 0,752$, für $30 \text{ }^\circ\text{C}$: $K(t) = 0,717$.

Der Faktor κ schwankt zwischen 1,1 und 3,6 und beinhaltet eine Angabe über den vertikalen Verlauf der Wasserdampfdichte. Setzt man diese Zahlen in die Gleichung ein, so erhält man Werte für die Gegenstrahlung, die sich bei großer Feuchte um bis zu 27 % unterscheiden. Bei klarem Himmel ist die Wärmestrahlungsbilanz 0,45 bis 0,3 mal so groß wie die Gegenstrahlung. Die mit der ganzen Streubreite der κ -Werte gerechneten Gegenstrahlungen führen also zu Werten der Wärmestrahlungsbilanz, die um 40-80 % variieren. Die starke Schwankung von κ spiegelt wieder, wie wenig repräsentativ die in 2 m Höhe gemessene Feuchte für große Teile der Luftmassen ist, aus denen die Gegenstrahlung kommt. Da im Winter der Wasserdampfgehalt der Luft um fast eine Zehnerpotenz kleiner ist als im Sommer, stammt die Gegenstrahlung dann aus viel höheren Schichten, deren Feuchteprofil mit dem Bodendampfdruck noch viel weniger zusammenhängt.

Die Gegenstrahlung wird stark erhöht durch Wolken, weil diese eine schwarze Strahlung nach Maßgabe der Temperatur ihrer Unterseite aussenden. Angström und Asklof geben für bedeckten Himmel an, die Wärmestrahlungsbilanz sei bei niedriger Wolkendecke auf 15 %, bei mittlerer auf 23 % und bei hoher Wolkendecke auf 80 % ihres Wertes bei klarem Himmel herabgesetzt. Man hat versucht, aus der (vom Deutschen Wetterdienst regelmäßig gemessenen) Höhe der Wolkenuntergrenze auf deren Temperatur zu schließen. Philipps gibt für die Abhängigkeit der Gegenstrahlung vom Bewölkungsgrad w eine Beziehung an, die linear in w ist:

$$G = G_0 (1 + K \cdot w) \quad (18a)$$

Er bestimmte folgende K-Werte in Abhängigkeit von der Höhe:

Höhe:	1,5 km	3 km	5 km	8 km
K:	0,87	0,74	0,62	0,45

Bei einem anderen Verfahren schließt man aus der Wolkenart auf Höhe und Temperatur. Bolz und Fritz geben eine Beziehung an, in die der Bedeckungsgrad mehr als quadratisch eingeht

$$G = G_0 (1 + K \cdot w^{2,5}) \quad (18b)$$

Dabei ist K ein Parameter der Wolkenart und nimmt folgende Werte an, für:

ci = Cirrus	= 0,04
cs = Cirrostratus	= 0,08
ac = Altocumulus	= 0,17
as = Altostratus	= 0,20
cu = Cumulus	= 0,20
st = Stratus	= 0,24

Bolz und Fritz betonen, daß diese Konstanten sehr klimagebunden und die angegebenen Zahlen lediglich Mittelwerte sind.

Zwischen der rechnerischen Bestimmung der Wärmestrahlungsbilanz und den Messungen ergeben sich vielfach größere Abweichungen (bis 160 %).

Da heute einfach zu handhabende Meßgeräte für die Erfassung der Gesamt- und der Globalstrahlung zur Verfügung stehen, sollte stets den Messungen der Vorzug gegeben werden. Die Wärmestrahlungsbilanz ergibt sich dabei aus den Meßwerten der Gesamtstrahlungsbilanz, abzüglich denen der Globalstrahlung.

1.2.3.4 Die Gesamtstrahlungsbilanz

In den bisher gemachten Ausführungen wurde dargelegt, wie die Gesamtstrahlungsbilanz durch Messung der Globalstrahlung und Berechnung der Wärmestrahlung gewonnen werden kann. Dabei wurden auch die Unsicherheiten geschildert, mit denen eine solche Berechnung behaftet ist. Wenn möglich sollte daher die Gesamtstrahlungsbilanz durch Messung erfaßt werden.

Gesamtstrahlungsbilanz-Meßgeräte bestehen aus zwei horizontal Rücken an Rücken montierten schwarzen Plättchen, von denen das eine mit der Himmelshalbkugel, das andere mit der Erde in Strahlungsaustausch steht. Zwischen beiden ergibt sich aus den Strahlungsströmen und der Wärmeleitung im Gerät eine Temperaturdifferenz, die der Strahlungsbilanz proportional ist. Diese Größe wird thermoelektrisch gemessen. Als Windschutz dienen hauchdünne Polyäthylen-Hauben, die nur sehr wenig Strahlung absorbieren.

Soweit Messungen nicht möglich sind, jedoch Witterungsberichte einer nahen Wetterstation vorliegen, können Werte für die Strahlungsbilanz aus einschlägigen Tabellenwerken entnommen (z. B. „Klimatographie von Österreich“ der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, 1958) oder mit Hilfe der Multiregressionsrechnung bestimmt werden. (19) Eine direkte Übertragung von benachbarten Wetterstationen ist im allgemeinen nicht empfehlenswert.

In Abb. 23 sind gemessene, typische Tagesverläufe der gesamten Strahlungsbilanz abgebildet. Der mit der Bewölkung schwankenden Wärmestrahlungsbilanz ist die ebenfalls mit der Bewölkung schwankende Globalstrahlung überlagert. Wenn die Sonne durch eine Lücke in der Bewölkung scheint, addieren sich zur Sonnenstrahlung noch von den Wolken ausgehende Gegenstrahlung und gestreute Sonnenstrahlung, so daß insgesamt momentan wesentlich mehr Strahlung ankommt als bei klarem Himmel.

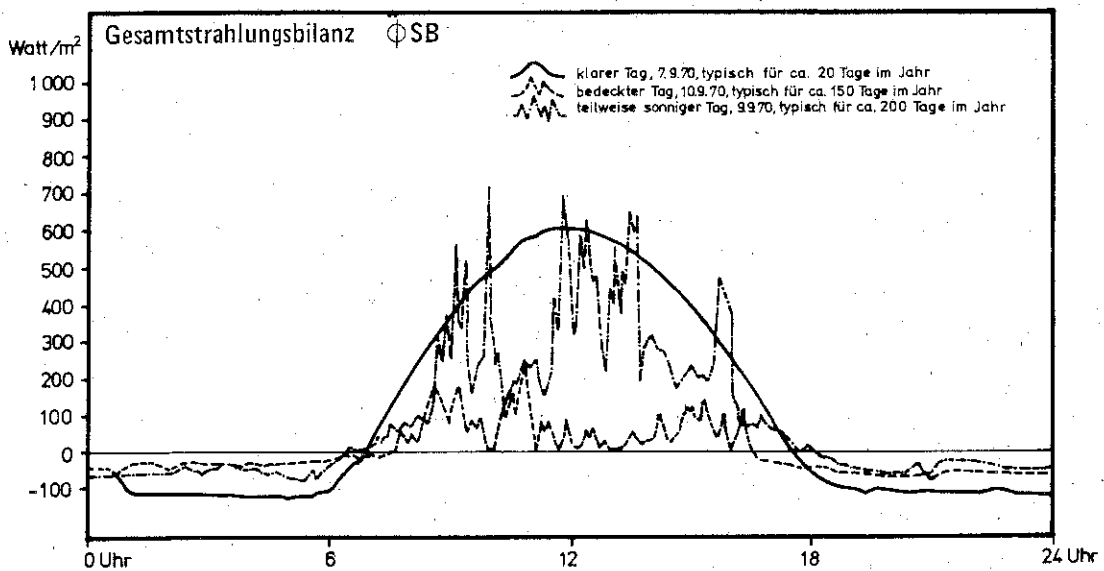
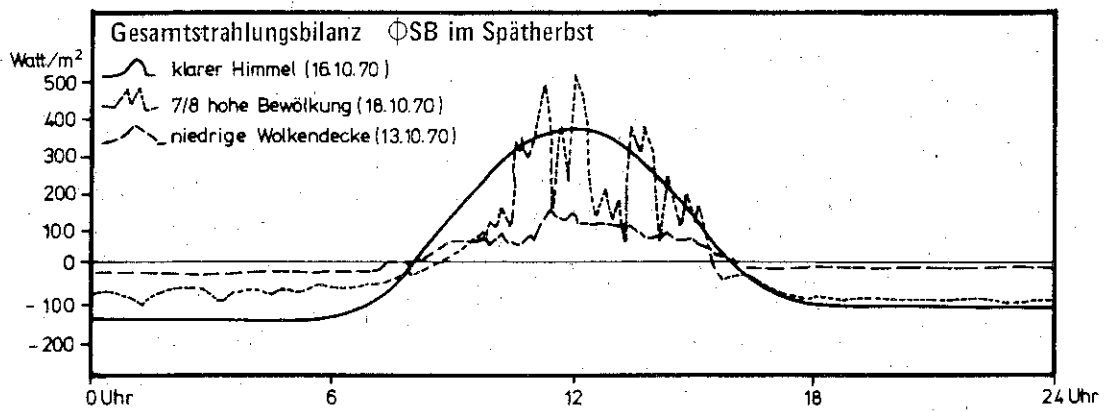
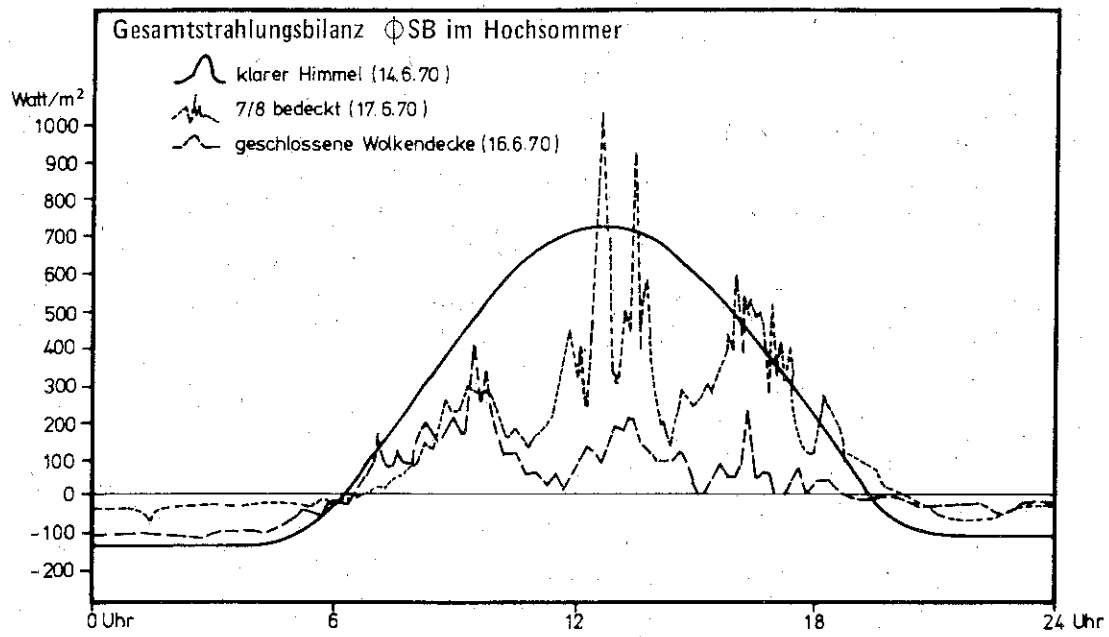


Abb. 23: Beispiele für die Gesamtstrahlungsbilanz über einer Wasserfläche (Müden-Mosel)

1.2.4 Verdunstung und Konvektion

1.2.4.1 Ermittlung des Wärmeaustausches infolge Verdunstung und Konvektion mit Hilfe der Stoffübergangszahl und der Wärmeübergangszahl

Die für die Abkühlung eines Gewässers wesentlichste Komponente der Wärmebilanz ist die Verdunstung. Da in der Regel der Dampfdruck an der Wasseroberfläche größer ist als in der darüber liegenden Luftschicht, verdunstet Wasser. Die hierfür erforderliche Verdampfungswärme hängt von der jeweiligen Wassertemperatur ab (z. B. 2495 kJ/kg bei 0 °C und 2453 kJ/kg bei 20 °C). In besonders gelagerten Fällen, wenn der Dampfdruck an der Wasseroberfläche geringer ist als in der darüber liegenden Luftschicht, findet Kondensation statt. In diesem Fall ergibt sich ein entsprechender Wärmegegewinn.

Der Wärmeaustausch infolge Verdunstung oder Kondensation zwischen Wasseroberfläche und Luft läßt sich nach folgender Gleichung berechnen:

$$\varphi_v = 10 \frac{r \cdot \beta}{R_d \cdot T_{KL}} (E - E_L) \quad (19)$$

In dieser Gleichung bedeuten

- φ_v = Wärmestromdichte bei Verdunstung oder Kondensation in J/cm² s
- r = Verdampfungswärme des Wassers in kJ/kg
- β = Stoffübergangszahl in m/h
- R_d = Gaskonstante des Wasserdampfes in J/kg K
- T_{KL} = mittlere absolute Temperatur (°C + 273 = K) der wassernahen Luftschicht
- E = Sättigungsdampfdruck bei der Temperatur des Wassers an der Phasengrenze zwischen Wasser und Luft in mbar
- E_L = Dampfdruck in der Luft über der Wasseroberfläche in mbar

Der direkte Wärmeübergang zwischen Gewässeroberfläche und Luft, also die Konvektion, errechnet sich nach der Beziehung

$$\varphi_L = 0,1 \alpha (T - T_L) \quad (20)$$

In dieser Gleichung bedeuten

- φ_L = Wärmestromdichte bei Konvektion in J/cm²h
- α = Wärmeübergangszahl in kJ/m²K
- T = Temperatur des Wassers an der Phasengrenze zwischen Wasser und Luft in K
- T_L = Temperatur der Luft in K

Grundsätzlich ist für alle Wärmestrahlungs-, Verdunstungs- und Konvektionsvorgänge die Temperatur der obersten Haut des Wassers maßgebend. Diese Oberflächentemperatur wird in der Regel nicht mit der Mitteltemperatur des Gewässers übereinstimmen. Wird vom Gewässer Wärme an die Luft abgegeben, so bildet sich im Wasser ein Temperaturgefälle zur Phasengrenze aus. Dadurch wird Wärme aus dem Innern der Flüssigkeit an die Wasseroberfläche transportiert. Geht umgekehrt der Wärmestrom von der Luft zum Wasser, dann ist die Phasengrenztemperatur höher als die Wassermitteltemperatur.

In Abb. 24 sind Temperaturverhältnisse im Phasengrenzbereich dargestellt, wie sie von Häußler gemessen wurden. Bisher liegen allerdings sehr wenig gemessene Temperaturprofile im Phasengrenzbereich von Flüssen vor. Bei Berechnungen nach Gleichung 19 und 20 müssen daher die erforderlichen Werte durch entsprechende Meßverfahren (z. B. Oberflächentemperaturmessung mittels Infrarotthermometer) jeweils im Einzelfall ermittelt werden.

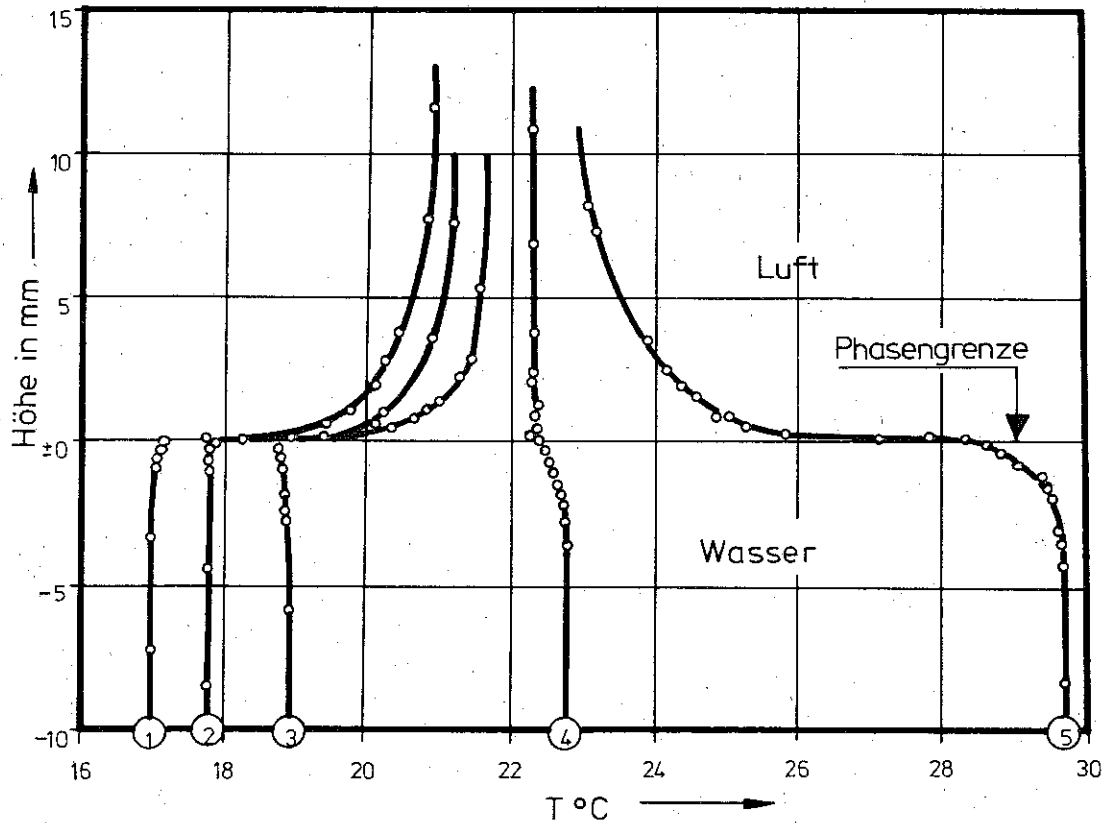


Abb. 24: Temperaturverhältnisse in der Phasengrenze zwischen Wasser und Luft

Eine wesentliche Schwierigkeit der Berechnung des Wärmeaustausches nach den Gleichungen 19 und 20 liegt in der Bestimmung der Stoffübergangszahl β und der Wärmeübergangszahl α . Beide sind unter anderem von der Windgeschwindigkeit, der Windrichtung im Verhältnis zur Fließrichtung und der Länge der vom Wind bestrichenen Wasseroberfläche abhängig. Mit zunehmender Windgeschwindigkeit nehmen auch β und α zu. Da zuverlässige Meßwerte für β und α , die den Einfluß aller erwähnten Einflußgrößen erkennen lassen, fehlen, soll zunächst die Frage untersucht werden, in welchem Verhältnis Verdunstung und Konvektion zueinander stehen.

Wird der Quotient φ_v/φ_L gebildet, so folgt aus Gleichung 19 und 20

$$\frac{\varphi_v}{\varphi_L} = 100 \cdot \frac{\beta}{\alpha} \cdot \frac{r}{R_d \cdot T_{KL}} \cdot \frac{E - E_L}{T - T_L} \quad (21)$$

Der Faktor $r/(R_d \cdot T_{KL})$ ist unter gegebenen Bedingungen bekannt. Für das Verhältnis β/κ gilt für Wasserdampf-Luft-Gemische mit hinreichender Genauigkeit nach der Lewisschen Beziehung

$$\frac{\beta}{\alpha} = \frac{1}{\rho \cdot c_p} \quad (22)$$

wobei

- ρ = Dichte der feuchten Luft in kg/m^3
- c_p = spezifische Wärme der feuchten Luft in kJ/kg K

Mit Hilfe der Gleichungen 21 und 22 können die Verhältniswerte φ_v/φ_L in Abhängigkeit von der Temperatur T der Phasengrenze für verschiedene relative Feuchtigkeiten der Luft berechnet werden. In der Abb. 25 sind die Ergebnisse einer solchen Berechnung für Lufttemperaturen von 15 und 25 °C aufgetragen. Aus beiden Abbildungen geht hervor, daß der Wärmeaustausch infolge Verdunstung den infolge Konvektion normalerweise weit übertrifft.

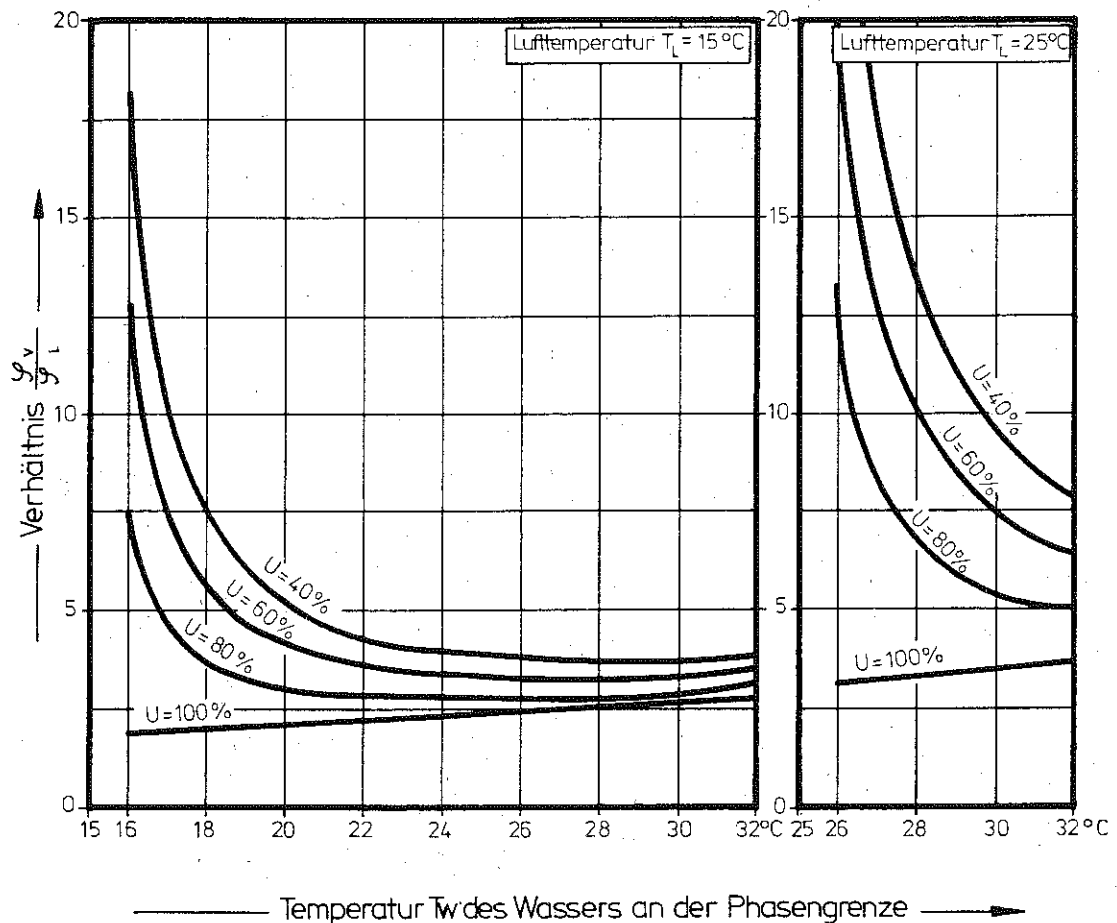


Abb. 25: Verhältnis der Wärmeabgabe durch Verdunstung φ_v zu der durch Konvektion φ_L in Abhängigkeit von der Phasengrenztemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit U

Für mittlere Verhältnisse kann angenommen werden

$$\begin{aligned} \frac{r}{T_{KL}} &= 8,16 \text{ J/kg K (1,95 kcal/kg K)} \\ R_d &= 461,4 \text{ J/kg K (47,05 mkp/kg K)} \\ \rho &= 1,1 \text{ kg/m}^3 \\ c_p &= 1,05 \text{ J/kg K (0,25 kcal/kg grd)} \end{aligned}$$

Mit diesen Zahlenwerten errechnet sich aus den Gleichungen 21 und 22, wenn E und E_L in mbar eingesetzt werden

$$\frac{\varphi_v}{\varphi_L} = 1,53 \frac{E - E_L}{T - T_L} \quad (23)$$

Dieselbe Beziehung wurde auch von Eckel und Reuter in der Arbeit „Zur Berechnung des sommerlichen Wärmeumsatzes in Wasserläufen“ (Geogr. Annaler 3/4 1950) angegeben.

Mit der Beziehung 23 kann bei der praktischen Auswertung die Konvektion rasch abgeschätzt werden, wenn die Verdunstung bekannt ist.

1.2.4.2 Einige einfache Beziehungen für die Ermittlung der Verdunstung

Aus den Darlegungen im vorangegangenen Abschnitt ging hervor, daß es sehr problematisch ist, den Wärmeaustausch infolge Verdunstung oder Kondensation über die Stoffübergangszahl β zu ermitteln, da über diese Größe noch zu wenig Messungen vorliegen. Für die praktische Ermittlung der Verdunstung werden daher meist empirische Formeln angewendet. Diese Formeln sind im allgemeinen nach dem Daltonschen Typ

$$V = f(v) \cdot (E - E_L)$$

aufgebaut.

V = Verdunstung oder Kondensation in mm/Tag

v = Windstärke in m/s

$f(v)$ = Funktion der Windstärke

E = Sättigungsdampfdruck bei der Temperatur des Wasser an der Phasengrenze in mbar

E_L = Dampfdruck der Luft in mbar

In Tabelle Seite 94/95 sind bekannte Verdunstungsformeln ohne Wertung zusammengestellt. Ein Eingehen auf die jeweils vorgegebenen und unterschiedlichen Bedingungen bei der Ermittlung dieser Gleichungen ist hier nicht angezeigt. Vielmehr werden sieben gleichwertige und gleichsinnige Untersuchungsergebnisse in Abb. 26 als bei hiesigen Gegebenheiten anwendbar herausgestellt.

Zusammenstellung bekannter Verdunstungsformeln für die Verdunstung freier Wasserflächen in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit

Autoren bzw. Untersuchung	Literaturquelle	Verdunstungsformel V in mm/d, v in m/s E-E _L in mbar
(1) Trabert 1896	Meteorologische Zeitschrift 1896 Nr. 7, S. 261-263	$V = 0,31 \cdot \sqrt{v} \cdot (E-E_L)$
(2) Angström 1916	Nach A. Wagner in Gerlands Beitrag zur Geophysik 34 : 100	$V = 0,82 \cdot \sqrt{v + 0,3} \cdot (E-E_L)$
(3) Thiesenhusen	Gesundheitsingenieur Heft 8, 1930 S. 113/119	$V = 0,53 \cdot \sqrt{v} \cdot (E-E_L)$
(4) Wüst	Veröffentlichungen des Instituts für Meereskunde Berlin 1920	$V = 0,45 \cdot \sqrt{v} \cdot (E-E_L)$
(5) Leven	Wärme- und Kältetechnik 1942 Heft 11 S. 161/167	$V = 0,562 \cdot v^{0,727} \cdot (E-E_L)$
(6) Brockamp und Werner	Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, 1963 Jahrgang 7, Heft 6 S. 149/154	$V = 0,408 \cdot v^{0,456} \cdot (E-E_L)$
(7) Lake Hefner Studie 1955	nach M. A. Kohler et al.-US Weather Bureau Research Paper Nr. 38 : 2	$V = (0,315 + 0,161 \cdot v) \cdot (E-E_L)$
(8) Lake Colorado City	nach J. E. Edinger und J. C. Geyer Edison Electric Inst. Publ. 65-902 : 35 (1965)	$V = 0,1289 \cdot v \cdot (E-E_L)$
(9) Meyer	dto.	$V = (0,251 + 0,056 \cdot v) \cdot (E-E_L)$
(10) WMO 1966	World Meteorol. Org., Tech. Note No. 83 : 83	$V = (0,130 + 0,0936 \cdot v) \cdot (E-E_L)$
(11) Rimsha und Donchenko 1957	nach S. L. Dingman und W. F. Weeks-Cold Regions Research & Engineering Labor (CRREL) Research Rep. No. 206 : 12 (1967)	$V = (0,2109 + 0,103 \cdot v) \cdot (E-E_L)$
(12) Schweizer Kühl- wasserbericht	Eid. Depart. d. Innern „Gewässer- schutztechnische Gesichtspunkte im Zusammenhang mit der Kühl- wasserentnahme und -rückgabe bei konventionell- und nuklear- thermischen Kraftwerken“ (1968)	$V = (0,118 + 0,093 \cdot v) \cdot (E-E_L)$

Autoren bzw. Untersuchung	Literaturquelle	Verdunstungsformel V in mm/d, v in m/s E-E _L in mbar
(13) Carrier	Journ. Ind. Eng. Chem. Band 13, 1921 S. 432/438	$V = (0,321 + 0,274 \cdot v) \cdot (E - E_L)$
(14) Himus and Hinchley	Chem. and Ind. Band 34 (1924)	$V = (0,559 + 0,244 \cdot v) \cdot (E - E_L)$
(15) Kohwer	U.S. Department of Agriculture 1931	$V = (0,33 + 0,198 \cdot v) \cdot (E - E_L)$
(16) Lurie und Michailoff	Gesundheitsingenieur Heft 21, 1936, S. 289/294	$V = (0,395 + 0,303 \cdot v) \cdot (E - E_L)$
(17) Sprenger	Heizung und Lüftung 1943, Heft 1, S. 7/8	$V = (0,395 + 0,301 \cdot v) \cdot (E - E_L)$
(18) Neuwirth	Über die Brauchbarkeit empirischer Verdunstungsformeln Arch. Met. Geophys. Biokl. Ser. B 22 (1974) S. 233-246	$V = (0,13 + 0,107 \cdot v) \cdot (E - E_L)$
(19) Spurr u. Scriven	British Experience of the Physical Behaviour of Heated Effluents. Symposium: Environmental Effects of Cooling Systems at Nuclear Power Plants. Oslo 74 IAEA-SM-187/2 S. 227-248	$V = (0,141 + 0,09 \cdot v) \cdot (E - E_L)$
(20) Braslavskij u. Nurgaliev	Neue Formel zur Berechnung der Verdunstung Kazachskij nončno-issledovatel'- skij institut energetiki, 1966, Vyp 4, S. 195-206	$V = (0,14 + 0,112 \cdot v + f \Delta t) \cdot (E - E_L)$

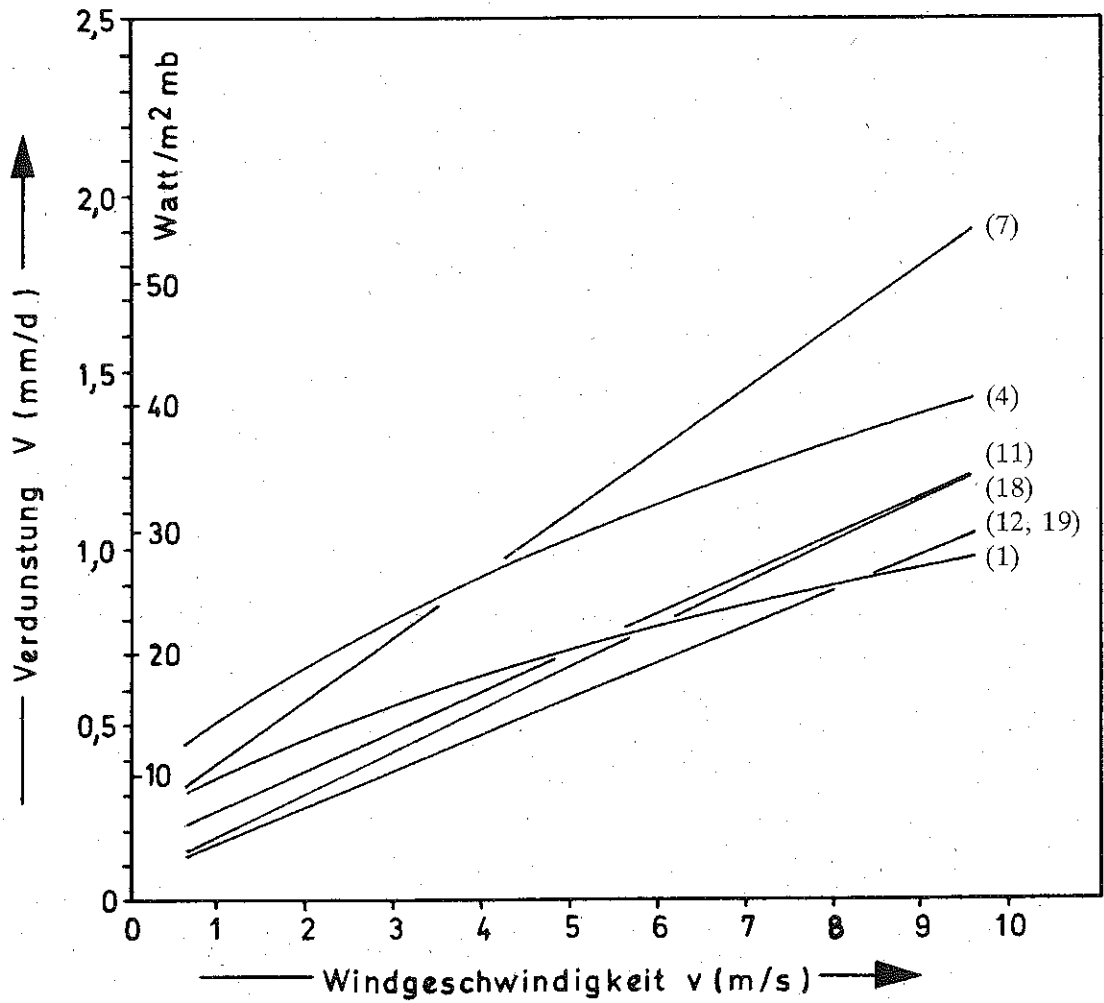


Abb. 26: Verdunstung V freier Wasserflächen in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit v (Auswahl einiger Verdunstungsformeln)
 (Dampfdruckdifferenz $E - E_L = 1 \text{ mbar}$)

2. Möglichkeiten zur Berechnung der Temperatur eines Gewässers

Wie in Abschnitt IV 1.2. erläutert, ergibt sich die in die Wärmehaushaltsgleichung

$$Q \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta T = P \quad (8)$$

einzusetzende Bilanz P der Wärmequellen und Wärmesenken als Summe einer Vielzahl von Einzelkomponenten, zu deren Ermittlung wiederum jeweils eine Anzahl von Parametern und Konstanten bekannt sein muß. Dies hat zur Folge, daß eine geschlossene Lösung dieser Gleichung, etwa zur Aufstellung von Temperaturganglinien $T = f(t)$ oder Temperaturlängsschnitten $T = f(x)$, nicht möglich ist. Zur Umgehung dieser Schwierigkeit stehen für die Anwendung der Wärmehaushaltsgleichung auf ein fließendes Gewässer grundsätzlich zwei Verfahren zur Verfügung: die Berechnung mittels einer Exponentialfunktion und die Simulation aufgrund der vollständigen Gleichung.

Verfahren der mathematischen Simulation und der Berechnung mittels Exponentialfunktion, die alle auf den hier beschriebenen Grundlagen beruhen und als Modifikationen der angegebenen Rechenmethoden gelten können, wurden aus Deutschland und Österreich (u. a. Eckel/Reuter, Flinspach/Flieg, Täubert, Glaser) und aus Frankreich (EdF, Halleux), Polen (Jaworski), Niederlande (Wemelsfelder), der Schweiz (Kuhn) und den USA (Jaske, Duttweiler, Edinger, Dingman und andere) bekannt. Diagramme und Anleitungen zu konkreten Berechnungen sind auch in (13), (26) und (27) zu finden.

2.1 Berechnung mit Hilfe einer Exponentialfunktion

2.1.1 Begründung und Ableitung der Exponentialfunktion

Bei der Benutzung der Wärmehaushaltsgleichung ist der vereinfachte Ansatz einer mathematischen Funktion für die Leistungsbilanz P (J/s) oder die Bilanz der Wärmestromdichten $\Sigma\varphi$ (J/s m²) unter Beschränkung auf die von der Wassertemperatur abhängigen wichtigsten Bilanzglieder Strahlung, Verdunstung und Konvektion erforderlich. Dieser Ansatz ist auf zweierlei Art möglich: Einmal kann die Bilanz der Wärmestromdichten als Funktion der Wassertemperatur selbst angesehen werden:

$$\Sigma\varphi = f(T_w) \quad (25)$$

oder sie wird als Funktion der Differenz der Wassertemperatur zu einer zunächst beliebigen Bezugstemperatur T_B angesetzt:

$$\Sigma\varphi = f(T_w - T_B) \quad (26)$$

Beiden Ansätzen liegt die Erfahrung zugrunde Morse, Fan/Hong (8; 9; 10)), daß sich für die Abhängigkeit der Wärmebilanz von der Wassertemperatur eine leicht konvexe Kurve wie in Abb. 27 ergibt. Bei Fan/Hong (10), wird diese Kurve mit dem Ansatz 25 linear angenähert:

$$\Sigma\varphi = A + B \cdot T_w \quad (27)$$

und bei Morse quadratisch:

$$\Sigma\varphi = A \cdot T_w^2 + B \cdot T_w + C \quad (28)$$

Darin sind A , B und C jeweils aus Messungen zu bestimmende Konstante.

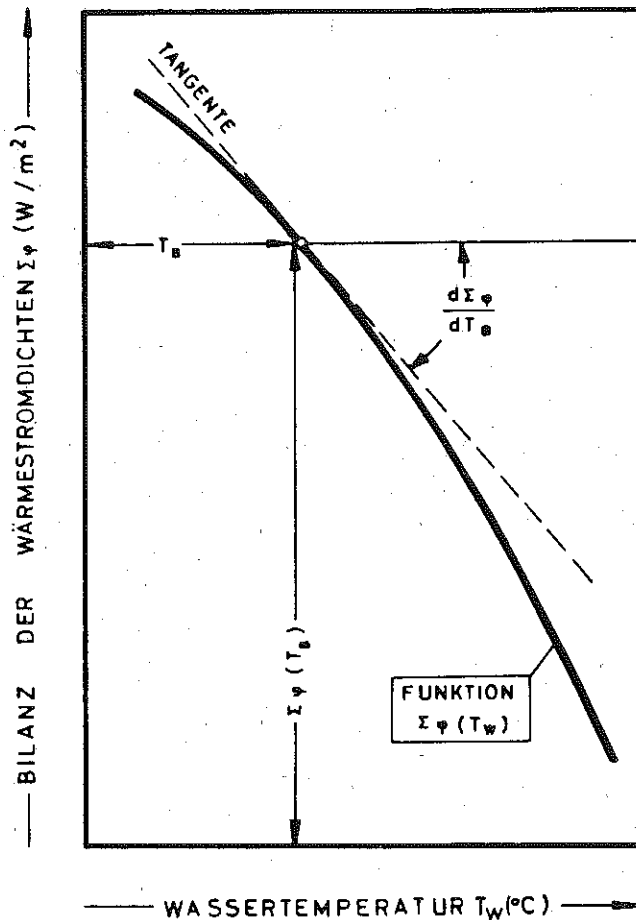


Abb. 27:
Die Bilanz der Wärmestromdichten
in Abhängigkeit von der Wassertem-
peratur (19)

In den meisten Arbeiten wird der Ansatz 26 benutzt, der sich mathematisch als Entwicklung der Funktion $\Sigma\varphi = f(T_w)$ in eine Taylor-Reihe mit Abbruch nach dem linearen Glied deuten läßt (Abb. 27):

$$\Sigma\varphi(T_w) = \Sigma\varphi(T_B) + (T_w - T_B) \cdot \frac{d\Sigma\varphi}{dT_B} + (T_w - T_B)^2 \cdot \frac{d^2\Sigma\varphi}{dT_B^2} + \dots \quad (29)$$

Dabei ist für die Genauigkeit der Näherung maßgebend, wie nahe bei der tatsächlichen Wassertemperatur T_w man die Bezugstemperatur T_B wählt. Üblicherweise (Duttweiler, Edinger/Duttweiler/Geyer, Kuhn (2; 6; 13)) wählt man als Bezugswert die Gleichgewichtstemperatur T_{GGW} , was physikalisch damit begründet wird, daß die Flußtemperatur immer die Tendenz hat, sich dem Gleichgewichtswert zu nähern. Da definitionsgemäß bei T_{GGW} die Wärmebilanz ausgeglichen ist ($\Sigma\varphi(T_{GGW}) = 0$), ergibt sich aus Gleichung 29 mit

$$\frac{d\Sigma\varphi}{dT_{GGW}} = K \quad (30)$$

als Proportionalitätsfaktor die Gleichung

$$\Sigma\varphi(T_w) = K (T_w - T_{GGW}) \quad (31)$$

Die nur als fiktiver Wert mit einigem Aufwand zu berechnende Gleichgewichtstemperatur liegt im allgemeinen weit von der tatsächlichen Wassertemperatur entfernt (Novotny/Krenkel,

Yotsukura u. a. (15; 17)). Ihre Anwendung als Bezugstemperatur ist deshalb schwierig. Einfacher ist es, mit der am Beginn einer Untersuchungsstrecke vorhandenen natürlichen Ausgangstemperatur zu rechnen. Dies kann bei voralpinen und Mittelgebirgsflüssen zu fehlerhaften Ergebnissen führen.

Eine gewisse Schwierigkeit bei der Anwendung dieser funktionalen Ansätze bereitet die ausreichend genaue Ermittlung der Gleichungskoeffizienten A, B, C oder K. Sie sind je nach Fließstrecke, Tages- und Jahreszeit verschieden und sollten aufgrund von Messungen bestimmt werden. Als Lösung der leicht umgeformten Differentialgleichung des Wärmehaushaltes

$$\frac{dT_W}{dt} = \frac{1}{\rho \cdot c \cdot h} \cdot \Sigma\varphi(T_W) \quad (10)$$

ergeben sich nach Einsetzen einer angenommenen $\Sigma\varphi(T_W)$ -Funktion, zum Beispiel nach Gl. 31, Ganglinien von exponentiellem Charakter mit der Form

$$T_W(t) = T_B + (T_O - T_B) \cdot e^{-\frac{K}{\rho hc} \cdot t} \quad (32)$$

wobei T_O die Temperatur zur Zeit $t=t_0$ ist. In dieser Form geben Wemelsfelder (7) und Edinger/Geyer die Gleichung an. Bei von Ammon/Wolf (3) hat sie die Form

$$t = \frac{c \cdot \rho \cdot h}{K} (\ln(T_O - T_B) - \ln(T - T_B)) \quad (33)$$

2.1.2 Bestimmung des Wärmeaustauschkoeffizienten K

2.1.2.1 Abschätzung aus der Wärmebilanz eines Tages

Aus Abb. 28 kann die zusätzliche Ausstrahlung in Abhängigkeit von der mittleren Wassertemperatur abgelesen werden.

In Abb. 26 ist für verschiedene Verdunstungsformeln in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit die Verdunstungsrate in mm/d für eine Dampfdruckdifferenz von 1,33 mbar angegeben. Die mittlere Dampfdruckdifferenz bei Änderung der Wassertemperatur um 1 K läßt sich bei konstanter Luftfeuchtigkeit aus Tafelwerken in mbar entnehmen. Aus der Verdunstungsrate in mm/d kann über die Verdampfungswärme die Wärmeabgabe in $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1} \text{K}^{-1}$ berechnet werden.

Aus Gleichung 23 kann das Verhältnis von Konvektion zu Verdunstung und damit der Konvektionsanteil über den Verdunstungsanteil in $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1} \text{K}^{-1}$ bestimmt werden.

Die Summe der Anteile aus Ausstrahlung, Verdunstung und Konvektion liefert den mittleren Wert für den Wärmeaustauschkoeffizienten K als Funktion des Temperaturbereiches. Bei Kenntnis des Wertes K kann nach der Gleichung 32 die Zeit oder Fließstrecke (Fläche) für das Abklingen einer künstlichen Erwärmung ($T - T_B$) berechnet werden. Edinger/Geyer und Wolf (18) haben für die Bestimmung von K und der Gleichgewichtstemperatur T_{GEW} Hilfstafeln und Diagramme veröffentlicht.

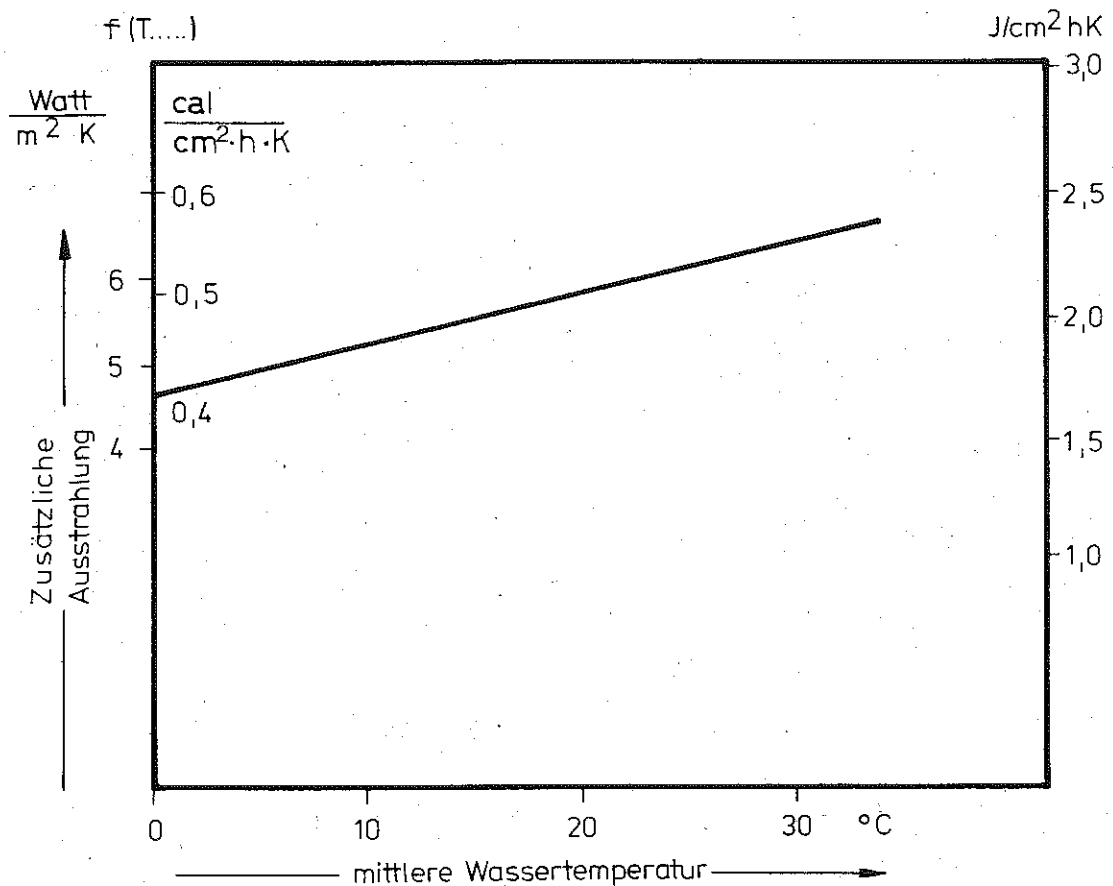


Abb. 28: Zusätzliche Wärmeausstrahlung einer Wasserfläche pro Grad Übertemperatur gegenüber der Bezugstemperatur in Abhängigkeit von der mittleren Wassertemperatur

2.1.2.2 Ableitung aus bekannten Temperaturverläufen

Sind Temperaturverläufe längs der Fließstrecke bekannt, so können die Werte für

$$\frac{K}{h \cdot \rho \cdot c}$$

mittels Gleichung 32 oder 33 bestimmt werden.

2.1.2.3 Abschätzung aus dem Vergleich von täglichen Mittelwerten der Luft- und Wassertemperatur (Wemelsfelder)

Wemelsfelder geht von folgender Hypothese – sie hat nur im Küstenbereich Gültigkeit – aus:

„Im großen und ganzen weisen Luft- und Wassertemperatur die gleiche Jahresganglinie auf, dabei liegt die Wassertemperatur in jedem Monat des Jahres konstant einige Grade höher als die Lufttemperatur. Die Luft reagiert schnell und heftig auf den Einfluß der Naturfaktoren, d. h. praktisch unmittelbar. Das Wasser aber folgt mit den Tagesgradienten nicht mit seiner Endtemperatur.“

Aus dem Vergleich von Tagesgradienten (Änderungsgeschwindigkeit) und Differenzen zwischen Luft- und Wassertemperatur versucht Wemelsfelder aus einer großen Zahl von Meßwertpaaren sowohl den Wärmeaustauschkoeffizienten K als auch die Gleichgewichtstemperatur T_{GGW} für eine bestimmte Fließstrecke für holländische Gewässer zu bestimmen.

2.1.3 Beurteilung der Exponentialmethode

Für die Berechnung der thermischen Verhältnisse eines Gewässers nach der Exponentialfunktion ist nur ein geringer Rechenaufwand erforderlich. Die Bezugstemperatur kann für jeden Gewässerabschnitt ohne großen Aufwand durch Meßreihen überprüft werden. Obwohl beide sowohl entlang des Flußlaufes als auch über den Tageslauf ständigen Änderungen unterliegen, genügt es in der Praxis meistens, Mittelwerte (für einen Zeitabschnitt, Flußabschnitt, Abfluß) anzusetzen. Für spezielle Berechnungen kann jedoch auch der tatsächliche Wert eingesetzt und mit variablen T_{GGW} - und K -Werten gerechnet werden.

Die Eichung der Berechnung geschieht anhand von Meßreihen am Gewässer. Der Vorteil liegt bei der Exponentialfunktion in einem verhältnismäßig geringen Meßaufwand. Meist ist hier, wie bei allen anderen Verfahren, die mangelhafte Qualität des zur Verfügung stehenden Beobachtungsmaterials die Quelle von Fehlern. Im allgemeinen wiegen die Vorteile erheblich stärker als die von Kritikern dem Verfahren angelasteten Ungenauigkeiten.

In der Praxis hat sich die Bestimmung der thermischen Verhältnisse eines Gewässers mit Hilfe der Exponentialfunktion gut eingeführt und bewährt.

2.2 Computer-Simulation der Energieaustauschvorgänge

Bei der Simulation werden die einzelnen Komponenten der Wärmebilanz wie in Abschnitt IV 1. beschrieben jeweils aufgrund von Daten für die vorkommenden Parameter berechnet, zur Leistungsbilanz P aufsummiert und in die Wärmehaushaltsgleichung 8 eingesetzt, die dann je nach den gewünschten Orts- und Zeitschritten die Temperaturänderungen ΔT des Gewässers liefert. Auf die Anwendung der Simulation wird später in Abschnitt V 2. eingegangen.

V. Kapitel

Berechnungsunterlagen und Rechenverfahren zur Ermittlung der Temperatur eines Gewässers

1. Bezugsdaten

1.1 Bezugsabfluß und natürliche Gewässertemperatur

Im Kap. II 2 „Sauerstoffhaushalt“ war dargelegt worden, daß kritische Verhältnisse im Gewässer in der Regel bei hochsommerlichen Wetterlagen mit geringem Abfluß und maximalen Wassertemperaturen sowie am Ende der Vegetationsperiode im Herbst bei minimalem Abfluß auftreten werden.

Die kritischen Fälle sind z. Z. im einzelnen quantitativ noch nicht exakt erfaßbar; es können lediglich qualitative Angaben gemacht werden, da die Untersuchungen über die Beziehungen zwischen Abfluß, Gewässertemperatur und Wetterlage noch nicht abgeschlossen sind. Vor allem kann noch nicht angegeben werden, mit welcher Häufigkeit solche für das Gewässer entscheidenden Wetterlagen auftreten und welche Extremwerte für das Gewässer mit den entsprechenden meteorologischen Daten gekoppelt werden müssen.

Kritische Verhältnisse für das Gewässer können eintreten:

Im Sommer bei geringem Abfluß und hohen Wassertemperaturen (Juni bis August),

- wenn nach einer längeren Schönwetterperiode am Abend aufziehende Bewölkung die nächtliche Ausstrahlung behindert
oder
- an Tagen mit sommerlicher Schwüle und geringer nächtlicher Abkühlung.

Im Herbst (September bis November),

- wenn nach einem trockenen Sommer minimaler Abfluß mit erhöhten Wassertemperaturen und Dunst- oder Nebelbildung (geringe Ein- und Ausstrahlung) zusammenfällt, da diese Wetterlage das Absterben des Planktons beschleunigt und zu einer zusätzlichen Beanspruchung des Sauerstoffhaushaltes führt.

Die Auswertungen von Wassertemperaturmessungen haben gezeigt, daß im Sommer solche kritischen Perioden selten länger als 20 Tage andauern. Da die Kombination von Extremwerten der Gewässerdaten (Abfluß, Temperatur) mit den extremen meteorologischen Daten die Situation zu ungünstig wiedergeben würde, sollte für den Abfluß mit dem Mittelwert einer solchen Periode gerechnet werden. Hierdurch wird auch berücksichtigt, daß der gemessene niedrigste Tagesabfluß einer solchen Periode durch kurzfristige künstliche Einflüsse, wie Stauregelung und Wasserentnahmen bedingt sein kann.

In Anlehnung an die „Richtlinien und Muster zur Aufstellung und Anwendung von Reinhalteteordnungen für oberirdische Gewässer – Fassung Oktober 1965 – der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA)“ wird daher als Bezugsabfluß Q_T das niedrigste Mittel der ausgeprägten Niedrigwasserperioden einer längeren Jahresreihe angesetzt, die an je 20 aufeinanderfolgenden Tagen im Juni bis August (Bezugsabfluß im Sommer = Sommer Q_T) bzw. im September bis November (Bezugsabfluß im Herbst = Herbst Q_T) bestehen (Beispiel Abb. 29).

RHEIN-PEGEL KAUB

$F_N = 103\,730\text{ km}^2$

Abflußjahr 1947/48

Dauerzahlen vom 21.10.-9.11.1947

Unterschreitungsdauer in Tagen

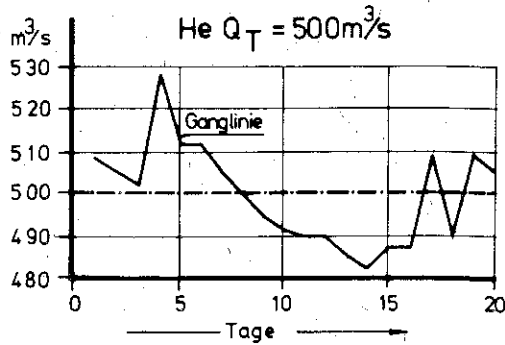
m^3/s Unterschreitungstage

490	4
500	9
510	17
520	19
530	20

Herbst (September-November)

Tag: m^3/s

21.10.	509
22.10.	505
23.10.	502
24.10.	528
25.10.	512
26.10.	512
27.10.	505
28.10.	500
29.10.	495
30.10.	492
31.10.	490
1.11.	490
2.11.	485
3.11.	482
4.11.	487
5.11.	487
6.11.	509
7.11.	490
8.11.	509
9.11.	505



LAHN-PEGEL LEUN

$F_N = 3594\text{ km}^2$

Abflußjahr 1947

Dauerzahlen vom 5.9.-24.9.1947

Unterschreitungsdauer in Tagen

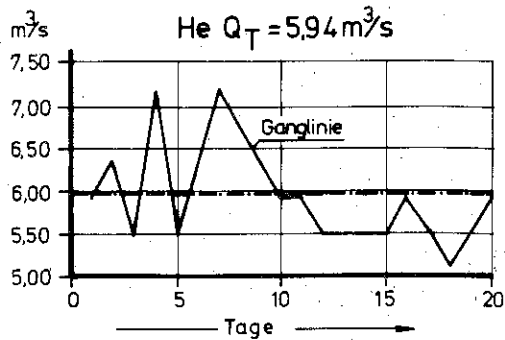
m^3/s Unterschreitungstage

7,50	20
7,00	18
6,50	17
6,00	14
5,50	1

Herbst (September-November)

Tag: m^3/s

5.9.	5,92
6.9.	6,34
7.9.	5,50
8.9.	7,18
9.9.	5,50
10.9.	6,34
11.9.	7,18
12.9.	6,76
13.9.	6,34
14.9.	5,92
15.9.	5,92
16.9.	5,50
17.9.	5,50
18.9.	5,50
19.9.	5,50
20.9.	5,92
21.9.	5,50
22.9.	5,12
23.9.	5,50
24.9.	5,92



WESER-PEGEL INTSCHEDE

$F_N = 37\,906\text{ km}^2$

Abflußjahr 1947

Dauerzahlen vom 12.8.-31.8.1947

Unterschreitungsdauer in Tagen

m^3/s Unterschreitungstage

95,0	20
90,0	16
85,0	12
80,0	5
75,0	0

Sommer (Juni-August)

Tag: m^3/s

12.8.	95,2
13.8.	94,6
14.8.	92,2
15.8.	92,2
16.8.	88,6
17.8.	87,4
18.8.	83,8
19.8.	83,2
20.8.	85,0
21.8.	85,0
22.8.	80,8
23.8.	81,4
24.8.	80,2
25.8.	78,5
26.8.	76,5
27.8.	78,5
28.8.	77,0
29.8.	80,2
30.8.	83,8
31.8.	77,5

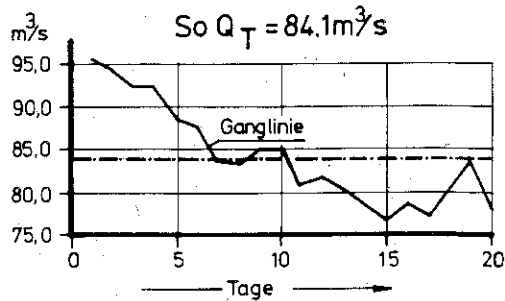


Abb. 29: Festlegung von Bezugsabflüssen

Niedrigwasserperiode von 20 aufeinanderfolgenden Tagen mit dem niedrigsten überhaupt bekannten Abflußmittel –






Bei Gewässern, für die keine langjährigen Beobachtungsreihen vorliegen, muß der Bezugsabfluß ggf. nach statistischen Verfahren ermittelt werden. Ferner ist zu beachten, daß bei sehr großen Niederschlagsgebieten, wie z. B. beim Rhein, die maßgebende Periode für den Bezugsabfluß zeitlich nicht einheitlich festgelegt werden kann (vgl. Herbst Q_T für die Pegel Kaub/Rhein und Leun/Lahn, Abb. 29). Für den Alpenraum gelten infolge des Einflusses der Schneeschmelze im Oberlauf der alpinen Gewässer besondere Bedingungen, auf die hier nicht näher eingegangen werden kann.

Abb. 30a:
 Beobachtete Höchstwerte
 der Wassertemperatur
 – verschiedene Perioden –



Abb. 30b:
 Linien gleicher mittlerer
 jährlicher Maxima der
 Lufttemperatur – verschiedene
 Perioden-(erreicht, überschritten)
 M. 1 : 2 500 000

Isolinien:

34°C	
33°C	
32°C	
31°C	
< 31°C	



Bezugsdaten für Gewässertemperaturen liefern die Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbücher. Soweit keine kontinuierlichen Messungen des Tagesganges oder zumindest tägliche Messungen der Wassertemperatur vorliegen, sollte für den Sommer sicherheitshalber mit der höchsten gemessenen Gewässertemperatur (HHT) gerechnet werden, für den Herbst mit dem Höchstwert (Herbst HHT) dieser Periode.

Bei Vorflutern aus dem voralpinen und Mittelgebirgsraum treten die Extremwerte von Niedrigwasserabfluß und hohen Wassertemperaturen im allgemeinen nicht zur gleichen Zeit auf. Eingehende Untersuchungen zur Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Auftretens von Trocken- und Warmwasserperioden (23) sind deshalb zu empfehlen.

Liegen kontinuierliche Messungen vor, ist mit dem höchsten Mittelwert einer längeren Jahresreihe von 120 aufeinander folgenden Stunden (5 Tage) mit extremen Wassertemperaturen zu rechnen (Abb. 30a und 30b). Liegen tägliche Messungen vor, so können diese nur gemittelt werden, wenn die Meßzeiten zwischen 10.00 und 18.00 Uhr liegen.

Für die Zuordnung auf Sommer und Herbst gilt das Gleiche wie beim Bezugsabfluß Q_T .

1.2 Meteorologische Werte

Bezugsdaten für die erforderlichen meteorologischen Angaben können am einfachsten ermittelt werden, wenn die Wetterlagen und zugehörigen meteorologischen Werte gesucht werden, die zu Zeiten vorherrschen, an denen kritische Wassertemperaturen und Wasserführungen gemessen wurden. Wie bereits in Kap. II 1. dargelegt, sind diese Untersuchungen noch nicht abgeschlossen; sie sind zunächst auch nur dort sinnvoll, wo die vorhandenen meteorologischen Meßwerte mit hinreichender Sicherheit auf das Gewässer übertragen werden können. Dies wird eher im nordwestdeutschen und norddeutschen Flachland zutreffen als im Bereich der deutschen Mittelgebirge und Süddeutschlands, wo die meteorologischen Stationen häufig erheblich höher als das Gewässer liegen bzw. enge Flußtäler das Gewässer zeitweise beschatten. Bis zum Abschluß der langwierigen genaueren örtlichen Untersuchungen muß daher mit den bisher bekanntgewordenen, mit hinreichender Genauigkeit übertragbaren Meßergebnissen gerechnet werden.

Für eine Ableitung der Meßwerte von benachbarten Klimastationen gibt die „Klimatographie von Österreich“ (vergl. Abschn. IV 1.2.3.4.) wertvolle Hinweise. Dort und in der sonstigen einschlägigen Literatur sind auch Tabellen zu finden, anhand derer noch fehlende meteorologische Parameter abgeschätzt werden können. Gegebenenfalls kann die Übertragung von einer nahen Wetterstation mit Hilfe der Regressionsrechnung durchgeführt werden.

Globalstrahlung (I + H)

Die für die Globalstrahlung (direkte Sonnenstrahlung I + diffuse Himmelsstrahlung H) einzusetzenden Werte können nur durch Messung gewonnen werden. Da bisher nur an wenigen meteorologischen Stationen solche Messungen durchgeführt wurden, diese Stationen darüber hinaus nur teilweise für das Gewässer repräsentative Werte liefern, muß bis zum Vorliegen genauerer Meßergebnisse mit Kurvenverläufen der Globalstrahlung gerechnet werden, die nach Messungen im süddeutschen Raum für einen extremen Hochsommertag und einen Herbsttag generalisiert wurden (Abbildung 31). Es ist jedoch zu beachten, daß nur etwa 85 % der einfallenden Strahlung in Wärme umgewandelt wird, und somit der thermisch wirksame Anteil der Globalstrahlung nur 0,85 (I + H) beträgt.

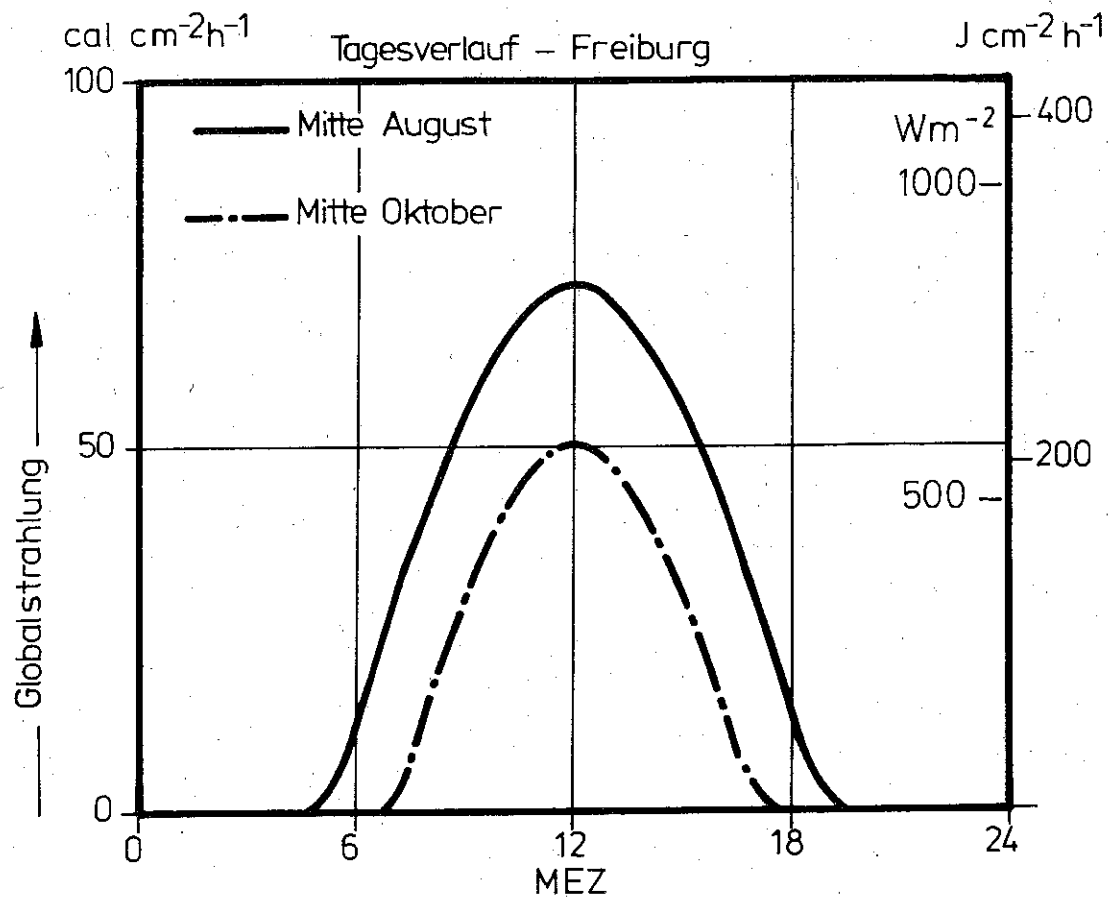
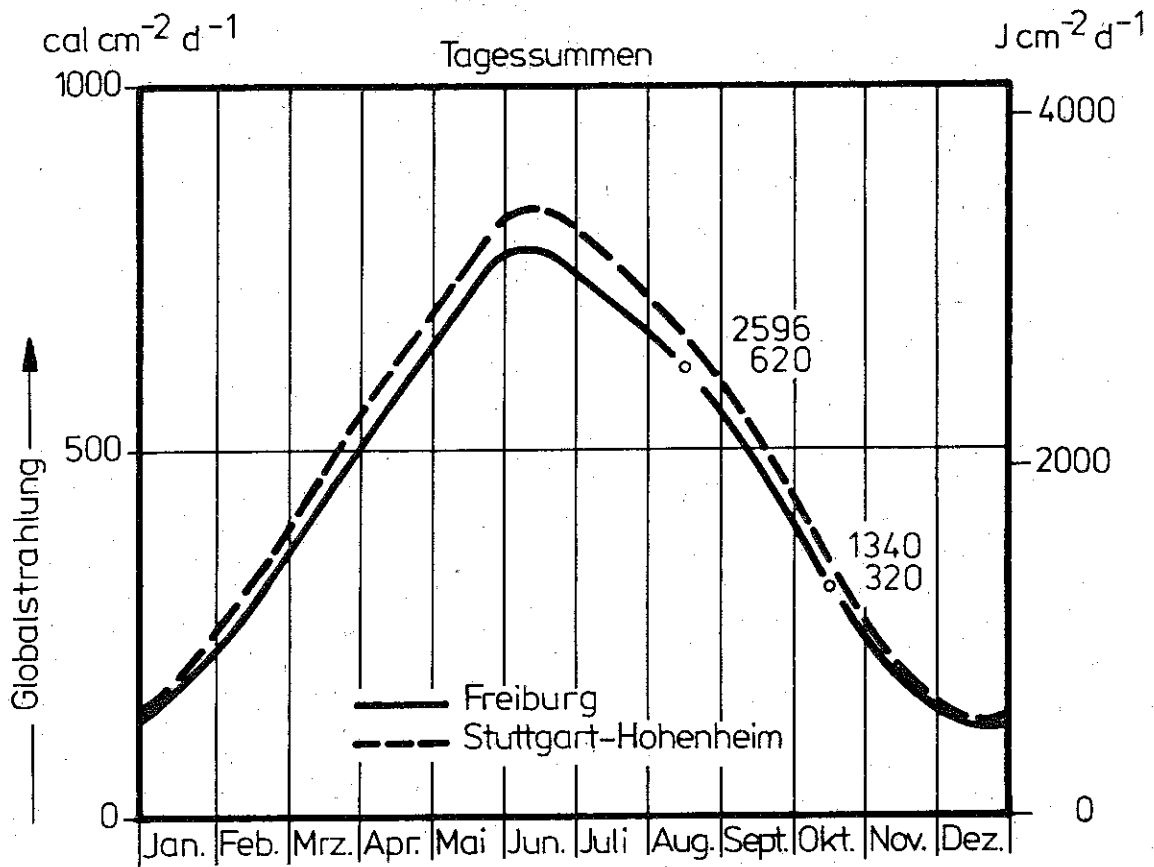


Abb. 31: Extremwerte der zugeführten Strahlungsenergie aus der direkten Sonnenstrahlung und der diffusen Himmelsstrahlung

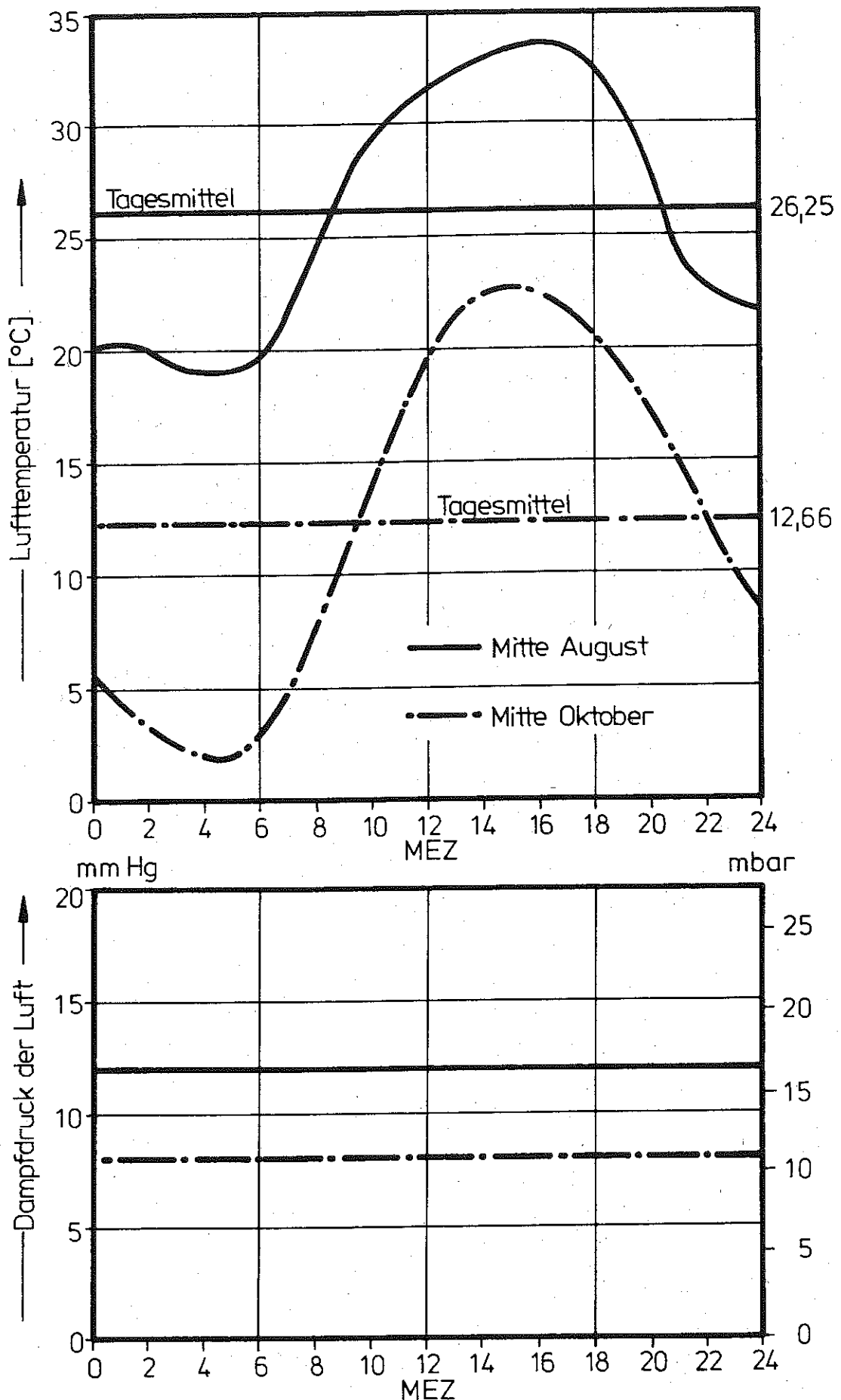


Abb. 32: Extremwerte des Tagesverlaufs von Lufttemperatur und Dampfdruck der Luft

Für I + H sind, entsprechend dem betrachteten Zeitpunkt, die aus der Abbildung herausgegriffenen Ordinaten-Mittelwerte für das jeweilige Zeitintervall von einer Stunde einzusetzen.

Gesamt-Strahlungsbilanz

Vielfach ist es zweckmäßig, auf die Ermittlung der Werte für die Einzelglieder der Wärmestrahlungsbilanz zu verzichten und generalisierte Werte für die Gesamtstrahlung zu benutzen. Tagesganglinien für die Gesamtstrahlung sind in Kap. IV 1.2.3.4. dargestellt.

Windgeschwindigkeit

Nach Empfehlungen des Deutschen Wetterdienstes kann für die zunächst in Betracht kommenden Berechnungsfälle die Windgeschwindigkeit vorläufig mit 2,0 m/s angesetzt werden. In Flußtälern ist auf eine Abschirmung durch Hochufer und Bewuchs sowie auf die Hauptwindrichtung zu achten.

Dampfdruck, relative Luftfeuchte

Der Dampfdruck kann nach den Empfehlungen des Deutschen Wetterdienstes bei der maßgebenden Sommerwetterlage über den Tag konstant mit 16 mbar angesetzt werden, im Herbst mit 10,7 mbar. Mit diesen Dampfdrücken und der jeweiligen Lufttemperatur läßt sich die relative Luftfeuchte errechnen (s. Kap. V.2.) oder aus Tafeln entnehmen.

Lufttemperatur

Für die Lufttemperatur sind entlang des Flußlaufes im allgemeinen ausreichend viele Messungen vorhanden. Soweit dies nicht zutrifft, ist im Sommer in die Berechnung eine Temperaturganglinie (Abb. 32) einzuführen, deren Maximalwert mit dem in Abb. 30b (Isothermen) für den entsprechenden Flußlauf angegebenen mittleren jährlichen Maximum übereinstimmt. Für den Herbst kann die Temperaturganglinie nach Abb. 32 herangezogen werden.

Sonstige meteorologische Werte

Die weiter interessierenden meteorologischen Werte können in der Regel aus dem Beobachtungsmaterial der zahlreichen Klimahauptstationen und sonstigen Beobachtungsstellen gewonnen werden. Es handelt sich hierbei um:

Sonnenscheindauer,
Nebelbeobachtungen,
Luftdruck,
gegebenenfalls auch Niederschläge usw.

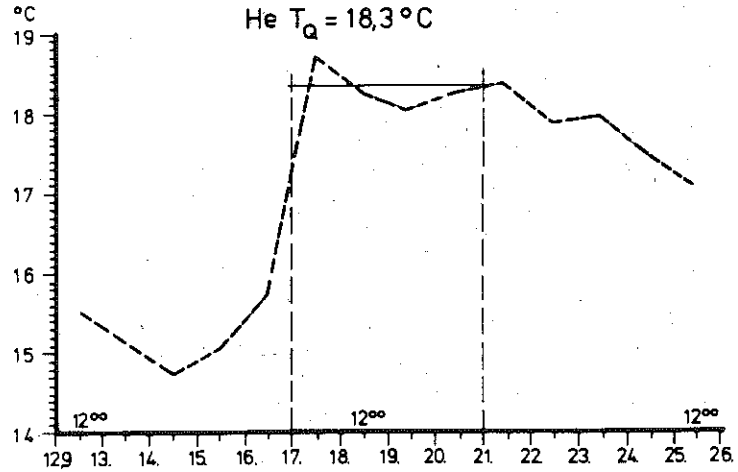
Diese Werte gehen in die nachgenannten Berechnungsverfahren nicht direkt als Einzelwerte ein, sie haben jedoch als Ausgangswerte einen Einfluß auf die zu ermittelnden Rechendaten.

WESER-PEGEL INTSCHEDE
 $F_N = 37\,900\text{ km}^2$

Jahresreihe 1939/70
 Abflußjahr 1961
 Bezugszeiten vom 17.9.-21.9.1961

Tag:	12.00 Uhr
17.9.	18,7
18.9.	18,2
19.9.	18,0
20.9.	18,2
21.9.	18,3

Herbst (September - November)



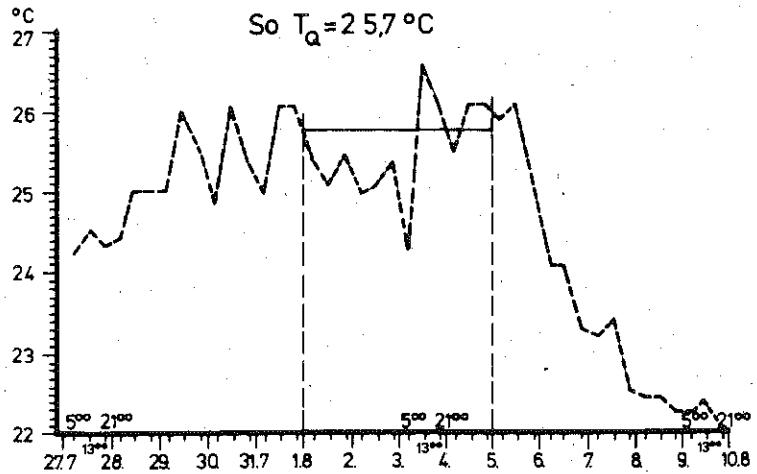
RHEIN-PEGEL WORMS
 $F_N = 68\,936\text{ km}^2$

Jahresreihe 1946/60
 Abflußjahr 1947
 Bezugszeiten vom 1.8.-5.8.1947

Tag:	5.00	13.00	21.00
1.8.	25,3	25,0	25,4
2.8.	24,0	25,0	25,3
3.8.	24,2	26,5	26,0
4.8.	25,4	26,0	26,0
5.8.	25,8	26,0	24,9

Maßgebend
 nur 13.00 Uhr Beobachtungen

Sommer (Juni - August)



WESER-PEGEL INTSCHEDE
 $F_N = 37\,902\text{ km}^2$

Jahresreihe 1939/70
 Abflußjahr 1960
 Bezugszeiten vom 30.7.-3.8.1960

Tag:	12.00
30.7.	25,0
31.7.	25,2
1.8.	25,0
2.8.	25,4
3.8.	25,6

Sommer (Juni - August)

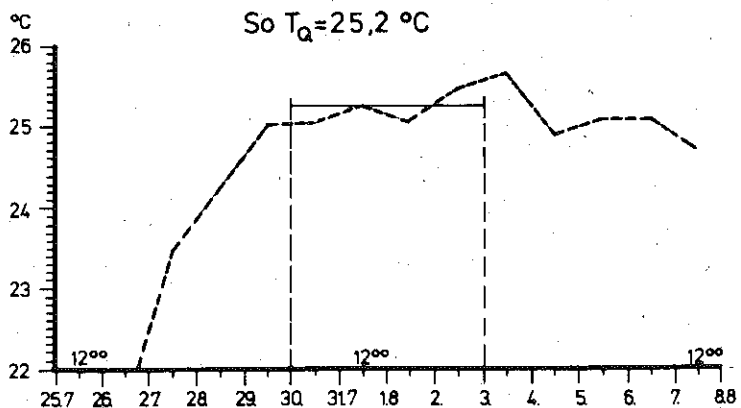


Abb. 33: Festlegung von Bezugswassertemperaturen
 Wärmeperioden von 5 aufeinanderfolgenden Tagen mit dem höchsten überhaupt be-
 kannten Wassertemperaturmittel -

2. Die numerische Ermittlung der Temperatur eines Gewässers durch Simulation der Wärmeaustauschvorgänge (Methode Eckel und Reuter)

Die praktische Berechnung geht von der in Kap. IV 1.1. erläuterten Beziehung 10 der Wärmebilanz mit $P = \varphi_{SB} + \varphi_V + \varphi_L$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{c \cdot \rho \cdot h} (\varphi_{SB} + \varphi_V + \varphi_L) \quad (10)$$

aus.

Da die Anteile von Strahlungsbilanz, Verdunstung oder Kondensation und Konvektion nicht durch mathematische Funktionen in Abhängigkeit von der Zeit erfaßt werden können, ist eine geschlossene Integration nicht möglich.

Als Näherungslösung muß deshalb nach einem Differenzenverfahren simuliert werden, das als Berechnungsintervall die Zeiteinheit Δt benutzt.

Damit wird auf Gleichung 9 zurückgegriffen:

$$\Delta T = \frac{1}{c \cdot \rho \cdot h} (\varphi_{SB} + \varphi_V + \varphi_L) \cdot \Delta t \quad (9)$$

In dieser Gleichung stellen dar:

- ΔT die Temperaturdifferenz zwischen Anfang und Ende der im Zeitintervall Δt durchflossenen Flußstrecke in K
- Δt das gewählte Zeitintervall in h
- ρ die Dichte des Wassers in g/cm^3
- c die spezifische Wärme des Wassers in J/Kg
- h die mittlere Tiefe der im Zeitintervall Δt durchflossenen Flußstrecke in cm
- φ_{SB} die Wärmestromdichte aus Strahlung in $\text{J/cm}^2 \cdot \text{s}$
- φ_V die Wärmestromdichte aus Verdunstung in $\text{J/cm}^2 \cdot \text{s}$
- φ_L die Wärmestromdichte aus Konvektion in $\text{J/cm}^2 \cdot \text{s}$

Wie schon in Kap. IV 1.1. ausgeführt, wird bei der praktischen Durchführung der Berechnung der direkt eingetragene Wärmestrom Φ_Q (Einleitungen, Nebenflüsse u. dgl.) beim Differenzenverfahren als Temperaturdifferenz an der jeweiligen Einleitungsstelle addiert.

Die für die Berechnung des Wärmestromes einzuführenden Größen sind im einzelnen an anderer Stelle dieser Richtlinien ausführlich mit Darstellung ihrer gesamten Problematik wiedergegeben. Sie werden hier der Übersichtlichkeit wegen wiederholt.

Die gesamte Wärmestromdichte aus der Strahlungsbilanz ergibt sich nach Kap. IV 1.2.3. zu

$$\varphi_{SB} = (I + H) + (G - A) - R \quad [\text{J/cm}^2 \cdot \text{s}] \quad (15)$$

Die Globalstrahlung $I + H$ wird als gemessene Größe in die Berechnung eingeführt. Durch Reflektion an der Wasseroberfläche und durch unvollkommene Umwandlung der einfallenden Globalstrahlung wird

$$(I + H) - R = 0,85 (I + H) \quad [\text{J/cm}^2 \cdot \text{s}] \quad (34)$$

Der Wärmestrom R aus der Reflektion an der Wasseroberfläche in Gleichung 15 ist somit erfaßt.

Die Wärmestromdichte aus atmosphärischer Gegenstrahlung kann nach der Beziehung berechnet werden:

$$\varphi_G = 5,7 \cdot 10^{-12} \cdot (T_L + 273)^4 \cdot (0,848 - 0,294 \cdot 10^{-0,052 \cdot E_L}) \quad [\text{J}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}] \quad (17)$$

Der Ausstrahlungsanteil berechnet sich nach der Gleichung

$$\varphi_A = 0,97 \cdot 5,7 \cdot 10^{-12} \cdot (T_W + 273)^4 \quad [\text{J}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}] \quad (14)$$

Für die Wärmestromdichte aus Verdunstung wird nach Kap. IV 1.2.4. mit der Beziehung

$$\varphi_v = \frac{3,17}{3600} \cdot (E_L - E_W) \cdot \sqrt{V} \quad [\text{J}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}]$$

und für den Konvektionsanteil mit der Formel

$$\varphi_L = \frac{2,1}{3600} \cdot (T_L - T_W) \cdot \sqrt{V} \quad [\text{J}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}]$$

gerechnet.

Der Sättigungsdruck des Wasserdampfes E_W läßt sich als Funktion der Temperatur T_W der Wasseroberfläche aus psychrometrischen Tafeln ablesen oder z. B. nach der Formel

$$E_W \text{ (mbar)} = 2,1718 \cdot 10^8 \cdot e^{-\frac{4157}{T_W + 239,09}}$$

ermitteln, während der Dampfdruck der Luft E_L aus den Meßgrößen Relative Feuchte U und Lufttemperatur T_L mittels der Formel

$$E_L \text{ (mbar)} = \frac{1,333 \cdot U}{100} \cdot 4,525 \cdot 10^{\frac{7,45 T_L}{235 + T_L}}$$

berechnet werden kann.

Aus einer näheren Betrachtung der vorstehenden Beziehungen ergibt sich zweckmäßigerweise folgendes Vorgehen:

1. direkte Berechnung der von der Wassertemperatur unabhängigen Größen (Globalstrahlungs- und Gegenstrahlungsanteil),
2. Berechnung der von der Wassertemperatur abhängigen Größen (Ausstrahlungs-, Verdunstungs- und Konvektionsanteil) sowie der aus der Wärmebilanz resultierenden Temperaturdifferenz (Iteration),
3. gegebenenfalls additive Veränderung der Intervallendtemperatur zur Berücksichtigung von Einleitungen.

Die Berechnung wird zweckmäßigerweise nach dem Schema gemäß Abb. 34 durchgeführt. In Abb. 35 ist die Ausgabe einer numerischen Durchrechnung wiedergegeben.

Die Vielzahl der zu berechnenden Einzelkomponenten, die erforderliche hohe Genauigkeit der Einzelberechnungen, das Iterationsverfahren für die Bestimmung der Temperaturdifferenz führen bei Anwendung mechanischer Rechenmaschinen zu einem sehr hohen Zeitaufwand (z. B. werden zur Berechnung einer Zeile in Abb. 35 30–40 Minuten benötigt). Der Vorteil der Benutzung elektronischer Datenverarbeitungsanlagen ist deshalb offensichtlich. An einer Beobachtungsstelle eines Gewässers treten insbesondere infolge des Tagesverlaufs der Globalstrahlung und Lufttemperatur Wassertemperaturschwankungen bis zu mehreren K auf. Um diese zu erfassen, ist die Berechnung für mehrere Startzeiten durchzuführen. Auf diesem Wege erhält man für die Beobachtungsstelle nicht nur eine einzelne, wenig repräsentative Wassertemperatur, sondern auch den Temperaturgang eines Tages. Soll nur ein Tagesmittel für die Wassertemperatur bestimmt werden, so wird die Durchführung der Berechnung für 6 Startzeiten als ausreichend angesehen. Soll jedoch für jeden Berechnungspunkt auch der Tagesgang und damit die Schwankungsbreite der Wassertemperatur berechnet werden, so sollte das Intervall für die Startzeiten nicht größer als der doppelte Wert des Fließzeitintervalls Δt , das der Länge des Flußabschnitts Δx entspricht, gewählt werden.

Für die Wahl des Zeitintervalls Δt sind verschiedene Bedingungen maßgebend:

1. innerhalb der im Zeitintervall durchflossenen Flußstrecke muß der Flußquerschnitt so weit gleichförmig sein, daß die Zuordnung einer mittleren Wassertiefe eindeutig möglich ist.
2. Das Zeitintervall und damit die zugehörige Fließstrecke müssen so groß sein, daß die zu berechnenden Temperaturdifferenzen über der möglichen Rechengenauigkeit liegen; hierbei ist besonders auf mögliche Rundungsfehler zu achten.
3. Die Wahl des Zeitintervalls muß so erfolgen, daß die im Tagesverlauf nicht konstanten meteorologischen Größen für den Zeitraum Δt als konstante Mittelwerte eingesetzt werden können.

In kleineren Gewässern mit sehr ungleichförmigen Fließverhältnissen kann es erforderlich werden, von einer konstanten Zeitschrittlänge abzugehen, was die Berechnungen allerdings erschwert.

Für große Flüsse hat sich die Wahl des Zeitintervalls $\Delta t = 1$ Stunde als zweckmäßig erwiesen.

Die Gewässerverhältnisse im Bereich der ersten Berechnungsschritte können es erfordern, daß bereits am Startpunkt der Berechnung mit einer von der Uhrzeit abhängigen Starttemperatur gearbeitet werden muß.

Die hydraulischen Gewässerdaten werden weitgehend durch den Abfluß bestimmt. Die Ermittlung der Schrittlängen und der mittleren Tiefen hat sehr sorgfältig zu erfolgen, da für die mittlere Wassertemperatur das Produkt aus mittlerer Tiefe und Schrittlänge bestimmend ist.

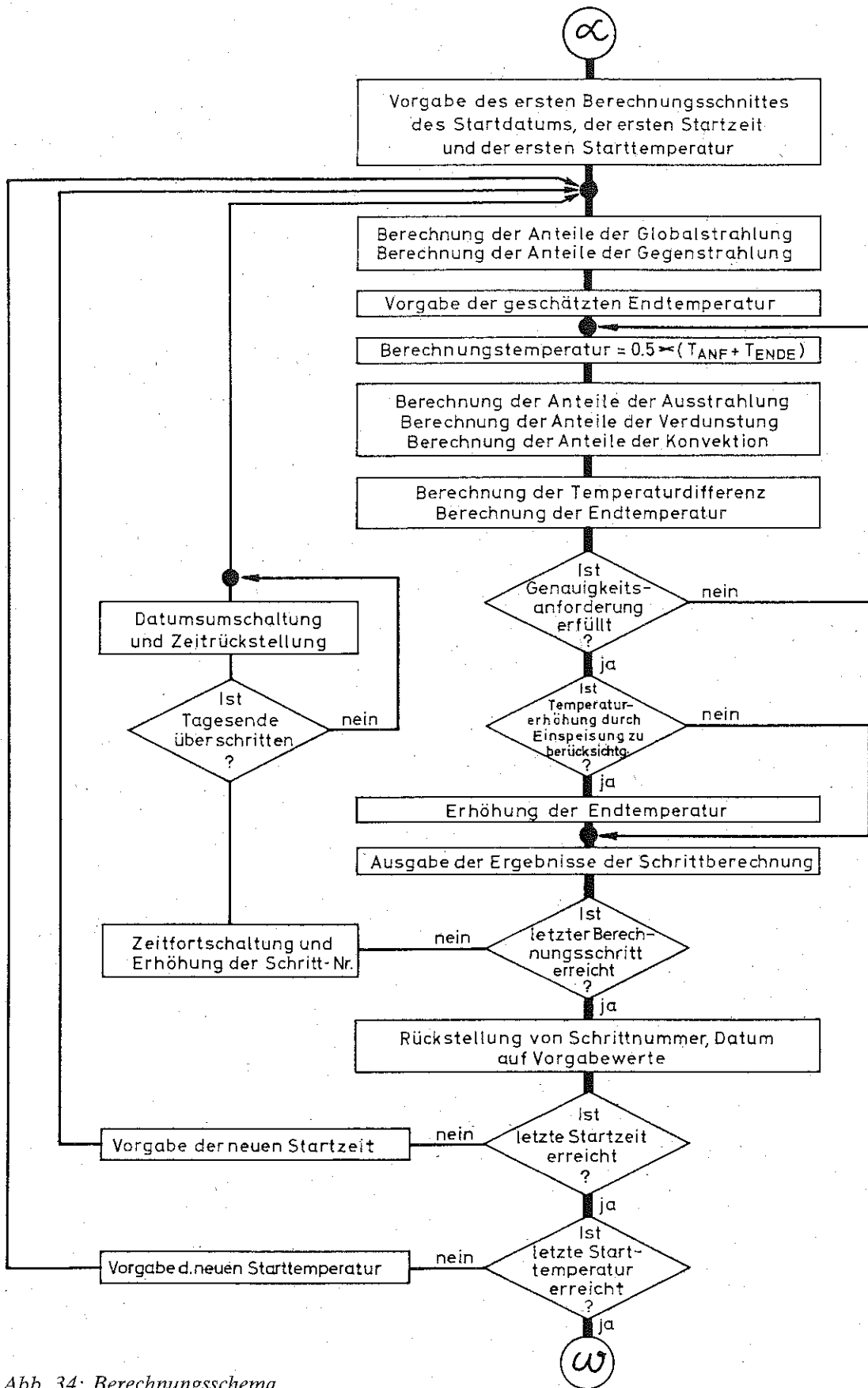


Abb. 34: Berechnungsschema

K	KM	Z	TWA	DTW	TWE	$0,85 \times S + D$	AEFF	V	L	HM	EL	EW	TL
[1]	[km]	[h]	[°C]	[grad]	[°C]	[$\text{cal cm}^{-2} \text{h}^{-1}$]				[m]	[mm Hg]	[mm Hg]	[°C]
1	102,92	0	+15,00	+0,063	+14,94	+0,000	-11,468	-6,774	-6,854	+4,000	+8,000	+12,790	+5,150
2	104,02	1	+15,31	-0,051	+15,26	+0,000	-11,971	-7,187	-7,868	+5,250	+8,000	+13,082	+4,000
3	105,94	2	+15,26	-0,048	+15,21	+0,000	-12,257	-7,418	-8,527	+5,870	+8,000	+13,033	+3,000
4	105,94	3	+15,21	-0,048	+15,16	+0,000	-12,466	-7,034	-9,016	+6,000	+8,000	+12,988	+2,250
5	106,86	4	+15,16	-0,042	+15,12	+0,000	-12,505	-6,990	-9,122	+6,750	+8,000	+12,943	+2,050
6	107,78	5	+15,12	-0,040	+15,08	+0,000	-12,363	-6,983	-8,815	+7,000	+8,000	+12,902	+2,450
7	108,80	6	+15,08	-0,035	+15,04	+0,340	-11,958	-6,879	-7,917	+7,500	+8,000	+12,864	+3,700
8	110,30	7	+15,04	-0,044	+15,00	+6,800	-11,202	-6,832	-6,257	+4,000	+8,000	+12,831	+6,050
9	112,68	8	+15,00	-0,004	+15,00	+19,125	-10,178	-6,773	-4,070	+4,750	+8,000	+12,789	+9,150
10	114,84	9	+15,75	+0,023	+15,77	+30,005	+9,419	-7,775	-2,293	+4,500	+8,000	+13,498	+12,450
11	116,78	10	+15,77	+0,038	+15,81	+37,825	+8,337	-7,807	-0,117	+5,750	+8,000	+13,520	+15,600
12	118,55	11	+15,81	+0,045	+15,85	+41,650	+7,390	-7,887	+1,735	+6,250	+8,000	+13,556	+18,300
13	120,42	12	+15,85	+0,039	+15,89	+41,650	+6,604	-7,918	+3,235	+7,750	+8,000	+13,599	+20,500
14	121,65	13	+15,89	+0,028	+15,92	+37,825	+6,062	-7,978	+4,251	+10,000	+8,000	+13,636	+22,000
15	123,48	14	+15,92	+0,023	+15,94	+30,005	+5,849	-8,008	+4,649	+9,000	+8,000	+13,662	+22,600
16	124,75	15	+15,94	+0,018	+15,96	+19,125	+5,859	-8,039	+4,833	+5,500	+8,000	+13,684	+22,600
17	125,73	16	+15,96	-0,005	+15,95	+6,800	+6,038	-8,063	+4,307	+6,250	+8,000	+13,701	+22,150
18	126,89	17	+15,95	-0,015	+15,94	+0,340	+6,373	-8,057	+3,685	+7,100	+8,000	+13,697	+21,250
19	128,05	18	+15,94	-0,016	+15,92	+0,000	+6,868	-8,037	+2,755	+7,600	+8,000	+13,683	+19,900
20	128,97	19	+15,92	-0,018	+15,91	+0,000	+7,481	-8,015	+1,584	+7,900	+8,000	+13,668	+18,200
21	130,30	20	+15,94	-0,022	+15,88	+0,000	+8,207	-7,992	+0,170	+7,300	+8,000	+13,651	+16,150
22	131,46	21	+15,88	-0,032	+15,85	+0,000	+9,037	-7,962	-1,885	+5,750	+8,000	+13,630	+13,750
23	132,54	22	+15,85	-0,037	+15,82	+0,000	+9,825	-7,919	-3,098	+5,660	+8,000	+13,600	+11,400
24	133,41	23	+15,82	-0,043	+15,77	+0,000	+10,475	-7,870	-4,464	+5,300	+8,000	+13,565	+9,400
25	134,24	24	+15,77	-0,051	+15,72	+0,000	+11,828	-7,812	-7,391	+5,300	+8,000	+13,524	+5,150
26	135,16	25	+15,72	-0,056	+15,67	+0,000	+12,165	-7,743	-8,156	+5,050	+8,000	+13,475	+4,000
27	136,08	26	+15,67	-0,051	+15,61	+0,000	+12,449	-7,669	-8,813	+5,680	+8,000	+13,422	+3,000
28	137,00	27	+15,61	-0,041	+15,57	+0,000	+12,655	-7,609	-9,299	+7,370	+8,000	+13,374	+2,250
29	137,92	28	+15,57	+0,035	+15,54	+0,000	+12,697	-7,546	+9,410	+8,550	+8,000	+13,335	+2,050
30	138,84	29	+15,54	-0,033	+15,51	+0,000	+12,559	-7,499	+9,108	+8,910	+8,000	+13,303	+2,450
31	139,76	30	+15,51	-0,032	+15,47	+0,340	+12,158	-7,455	+8,215	+8,540	+8,000	+13,271	+3,700
32	140,68	31	+15,47	-0,019	+15,46	+6,800	+11,403	-7,412	+6,558	+9,350	+8,000	+13,241	+6,050
33	141,51	32	+15,46	-0,003	+15,45	+19,125	+10,390	-7,386	+4,387	+9,800	+8,000	+13,222	+9,150
34	142,09	33	+15,45	+0,011	+15,46	+30,005	+9,282	-7,381	-2,889	+10,100	+8,000	+13,219	+12,450
35	142,67	34	+15,46	+0,019	+15,48	+37,825	+8,195	-7,396	+0,095	+11,700	+8,000	+13,230	+15,600
36	143,25	35	+15,48	+0,023	+15,51	+41,650	+7,238	-7,422	+1,861	+12,430	+8,000	+13,248	+18,300
37	144,62	36	+15,51	+0,087	+15,59	+41,650	+6,421	-7,453	+3,473	+13,580	+8,000	+13,270	+20,500
38	145,99	37	+15,51	+0,073	+16,73	+37,825	+6,421	-8,995	+3,721	+3,580	+8,000	+14,360	+22,000
39	147,07	38	+16,73	+0,042	+16,77	+30,005	+6,228	-9,093	+4,087	+4,440	+8,000	+14,429	+22,600

Abb. 35: Berechnungsbeispiel

K/ KENNZEICHNUNG DES BERECHNUNGSSCHRITTES
 KM/ KILOMETRIERUNG DES SCHRITTEDES
 Z/ UHRZEIT BEZOGEN AUF SCHRITTANFANG
 TWA/ WASSERTEMPERATUR AM SCHRITTANFANG
 DTW/ TEMPERATURDIFFERENZ
 TWE/ WASSERTEMPERATUR AM SCHRITTEDE
 S+D/ GLOBALSTRAHLUNG

AEFF/ EFFEKTIVE EINSFRAHLUNG
 V/ VERDUNSTUNG
 L/ KONVEKTION
 HM/ MITTLERE WASSERTIEFE
 EL/ LUFTFEUCHTE
 EW/ DAMPDRUCK DES WASSERS
 TL/ LUFTTEMPERATUR

VI. Kapitel

Hinweise für wasserrechtliche Verfahren

Kraftwerksplanungen können in wasserwirtschaftlicher Hinsicht nur aus ganzheitlicher, alle Ökofaktoren berücksichtigender Sicht beurteilt werden. Voraussetzung für eine solche Beurteilung ist die Kenntnis der Gegebenheiten, die durch Vorlage oder Beizug entsprechender Unterlagen nachzuweisen sind. Im einzelnen sind zu nennen:

- Angaben über Art und Leistung des Kraftwerkes (Kondensationsdampfkraftwerk, Gegen-druckkraftwerk, installierte elektrische Leistung, Zeitplan des stufenweisen Ausbaus)
- Angaben über den Einsatz des Kraftwerks (Zeitabfolge)
- Angaben über das Kühlsystem und die in den Vorfluter abzuführenden Wärmemengen (ggf. in Abhängigkeit von der Wasserführung und der Temperatur des Vorfluters) sowie über Kühlwassermenge, Aufwärmspannen des Kühlwassers und Verdunstungsverluste im Kühlsystem.
- Angaben über die Kühlwasserbehandlung (=Aufbereitung), über den Einsatz von Korrosionsschutzmitteln und von Stoffen zur Bekämpfung oder Beseitigung von Mikroorganismen sowie Angaben über Art und Umfang der Kesselspeisewasseraufbereitung.
- Angaben über die jahreszeitlich unterschiedliche Wasserführung des Vorfluters und der Wassertemperaturen sowie über den chemischen und biologischen Gewässerzustand
- Angaben über die voraussichtlich beeinflusste Gewässerstrecke, die zu erwartende Abkühlungsgeschwindigkeit, den Temperaturgradienten der Abbaugeschwindigkeit, den Sauerstoffhaushalt, bestehende und geplante Gewässernutzungen.

Aus der Vielzahl sowohl der möglichen Einwirkungen als auch der notwendigen Unterlagen für die Feststellung und richtige Beurteilung des Sachverhaltes läßt sich erkennen, daß allgemeingültige Forderungen nur den Rahmen bilden können, welcher die Forderungen des Einzelfalles umschließt. Grundsätzlich ist daher jeder Einzelfall gesondert, aber in Zusammenhang des betroffenen Flußlaufes zu behandeln. Nachteilige Wirkungen auf die Wasserbeschaffenheit, die Wassermengenwirtschaft und bestehende und geplante Nutzungen sowie sonstige Beeinträchtigungen des Wohls der Allgemeinheit sind durch Bedingungen und Auflagen zu verhüten oder auszugleichen. In jenen Fällen, in denen die wasserwirtschaftliche oder technische Entwicklung nicht bis zum Zeitpunkt des Endausbaues des Kraftwerkes voraussehbar ist, wird es sinnvoll, zunächst nur die Folgen einer noch überschaubaren bzw. mit hoher Wahrscheinlichkeit aus bekannten Tatsachen extrapolierbaren Entwicklung zugrunde zu legen. Das bedeutet, daß manchmal noch nicht der Endausbauzustand sondern nur ein bestimmter Teilausbauzustand begutachtet werden kann. Für den weiteren Ausbau sowie für den künftigen Betrieb des bestehenden Teilausbaues müssen deshalb entsprechende Vorbehalte in den Bescheid aufgenommen werden. Insofern sind zur Verhütung oder zum Ausgleich nachteiliger Wirkungen entsprechende Berechnungen und Auflagen je nach Lage des Einzelfalles in Betracht zu ziehen.

In den Kapiteln II und III wurden verschiedene Kriterien aufgeführt, deren Kenntnis bei der Festlegung von Auflagen und Bedingungen unerläßlich sind. In Überschau der vorliegenden Daten lassen sich folgende Empfehlungen geben:

Nach derzeitiger Erkenntnis sollte die durch die künstliche Wärmeeinleitung verursachte Temperatur eines Gewässers unter der Voraussetzung ausreichender Wassergüte im Vorfluter folgende Werte der rechnerischen Mischtemperatur nicht überschreiten:

1. Sommerwarme Gewässer:

$$T_{\max} = 28 \text{ °C}$$

2. Sommerkühle Gewässer:

$$T_{\max} = 25 \text{ °C}$$

3. Gewässer, deren Charakter als ausgesprochene Salmonidengewässer erhalten bleiben soll:

$$T_{\max} = 18 \text{ °C}$$

Als rechnerische Aufwärmspannen (ΔT_G) über die natürliche Temperatur in den Gewässern gelten unabhängig von den genannten maximal zulässigen Gewässertemperaturen, nachstehende Werte:

1. Sommerwarme Gewässer:

$$\Delta T_G = 5 \text{ K}$$

2. Sommerkühle Gewässer:

$$\Delta T_G = 3 \text{ K}$$

Bei ungünstigen Gewässergüteverhältnissen (z. B. schlechter als Gewässergüteklasse II – mäßig belastet = β -mesosaprob-) mit hoher Abwasserbelastung und instabilem Sauerstoffhaushalt sind alle genannten Richtwerte niedriger anzusetzen.

Nur in einzeln zu begründenden Ausnahmefällen sollten die zuständigen Behörden zeitlich und örtlich eng begrenzt eine Überschreitung dieser Aufwärmspannen um 2 K zulassen, wenn wasserwirtschaftliche Gesichtspunkte oder Maßnahmen zur Verbesserung der Gewässergüte dies geboten erscheinen lassen.

Die Kühlwassertemperatur und Kühlwasseraufwärmspannen sind vom jeweils angewandten Kühlsystem abhängig. Nachstehende Werte können auf Grund von Optimierungen nach derzeitigem Stand der Technik im allgemeinen eingehalten werden – bei besonderen meteorologischen Bedingungen können kurzzeitige Überschreitungen auftreten –:

1. Durchlaufkühlung $\max T_E = 30 \text{ °C}$, in Ausnahmefällen 33 °C
 $\max \Delta T_E = 10 \text{ K}$, in Ausnahmefällen 15 K
2. Ablaufkühlung $\max T_E = 33 \text{ °C}$
 $\max \Delta T_E = 10 \text{ K}$, in Ausnahmefällen 15 K
3. Kreislaufkühlung $\max T_E = 35 \text{ °C}$

Die eingeleitete Wärme ergibt sich als Produkt aus Kühlwassereinleitung und Kühlwasseraufwärmspanne.

Werden mehrere Kühlarten abwechselnd eingesetzt, so sind die Einleitungswerte für jede Art einzeln anzugeben.

In den wasserrechtlichen Bescheiden können auch Bedingungen und Auflagen hinsichtlich der im Zusammenhang mit der Warmwassereinleitung notwendig erscheinenden Maßnahmen aufgenommen werden, wie

- Einrichtung von Kühlwasser- oder Flußbelüftungsanlagen (Ausnützung vorhandener Gefälle zwischen Kraftschlußbecken und Kühlwassereinleitungsstelle zur künstlichen Belüftung, Kühlturbetrieb bei niedrigen Sauerstoffwerten im Vorfluter und Belüftung in der aufgewärmten Flußstrecke),
- angemessene Beteiligung an Maßnahmen zur Niedrigwasseraufhöhung je nach der Menge der Verdunstungsverluste im Verhältnis zur Niedrigwassermenge,
- Schonung des Fischbestandes durch geeignete Fischabweiser in der Kühlwasserentnahmestelle,
- Messungen zur Überwachung und zur Selbstkontrolle. Dabei sind insbesondere folgende Nachweise erforderlich: Kühlwassermenge, Temperaturen des Kühlwassers an der Entnahme- und Einleitungsstelle, Flußwassertemperaturen nach Durchmischung des Kühlwassers mit dem Flußwasser, Sauerstoffgehalt des Kühl- oder Flußwassers (evt. vor und nach der Belüftung).

**Zusammenstellung der bisher in der Bundesrepublik Deutschland erstellten
bzw. in Bearbeitung befindlichen Wärmelastpläne**

– Chronologische Ordnung nach Erstellungsdatum –

1. Wärmebelastung des Rheins
(Aare-Mündung bis unterhalb Biblis)
Mai 1970 (unveröffentlicht)
Landesstelle für Gewässerkunde und wasserwirtschaftliche Planung Baden-Württemberg,
im Auftrag des Innenministeriums Baden-Württemberg
2. Wärmelastplan Rhein (1. Auflage)
(Aare-Mündung bis holländische Grenze)
Mai 1971 (vergriffen)
Arbeitsgemeinschaft der Länder zur Reinhaltung des Rheins
3. Wärmelastplan Rhein (2. Auflage)
(Aare-Mündung bis holländische Grenze)
Oktober 1971
Arbeitsgemeinschaft der Länder zur Reinhaltung des Rheins
(Der Wärmelastplan wurde auch als „Beispiel eines Wärmelastplanes“ in der 1. Auflage
der „LAWA-Grundlagen“ veröffentlicht)
4. Wärmelastrechnungen Main
(Regnitzmündung bis Landesgrenze)
August 1972 (vergriffen)
Bayerisches Landesamt für Wasserversorgung und Gewässerschutz
5. Wärmelastplan Neckar
(Plochingen bis Mannheim)
Mai 1973
Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Umwelt, Baden-Württemberg
6. Wärmelastrechnungen Donau
(Neu-Ulm bis Staatsgrenze)
Juni 1973
Bayerisches Landesamt für Wasserversorgung und Gewässerschutz
7. Wärmelastplan Main
(Landesgrenze bis zur Mündung)
September 1973
Hessischer Minister für Landwirtschaft und Umwelt
8. Wärmelastplan für die Elbe
(Schnackenburg bis Cuxhaven)
1973
Arbeitsgemeinschaft für die Reinhaltung der Elbe, Hamburg
9. Wärmelastplan Weser
(Hannoversch-Münden bis zur Mündung)
Mai 1974
Arbeitsgemeinschaft der Länder zur Reinhaltung der Weser

10. Wärmelastplan für die Spree und Teile der von ihr abhängigen Kanäle, veröffentlicht im Gewässerkundl. Jahresbericht des Landes Berlin für das Abflußjahr 1974
11. Wärmelastrechnungen Isar
(Loisachmündung bis Donau)
September 1975
Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft
12. Internationaler Wärmelastplan der Mosel
(Metz bis Mündung in den Rhein)
in Bearbeitung, voraussichtl. Veröffentlichung 1979, Ad hoc-Arbeitsgruppe „Wärme- und Radioaktivitätsbelastung von Mosel und Saar“ der Internationalen Kommissionen zum Schutze der Mosel und der Saar gegen Verunreinigung
13. Wärmelastplan Lippe
(Lippstadt bis Mündung in den Rhein)
in Bearbeitung, voraussichtliche Veröffentlichung 1979
Landesanstalt für Wasser und Abfall, Nordrhein-Westfalen
14. Wärmelastrechnungen Inn
(Magerbach bis Donau)
in Bearbeitung
Oesterreichisch-Bayrische Arbeitsgruppe
15. Wärmelastrechnung Main – 1. Fortschreibung
(Regnitz von Pegnitz bis Landesgrenze Main)
in Bearbeitung, voraussichtliche Veröffentlichung 1979
Bayrisches Landesamt für Wasserwirtschaft

Literaturhinweise

- (1) Beiche, O.
Eckold, M. Kühlwasserprobleme am kanalisiertem Neckar in ihrer wasserwirtschaftlichen Verflechtung.
Wasserwirtschaft 51 (1961), Heft 11 S. 295
- (2) Duttweiler, D. W. A mathematical model of stream temperature, Dissertation
The Johns Hopkins University Baltimore USA, 1963
- (3) von Ammon, F.
Wolf, P. Der Kühlwasserbedarf bei der Stromerzeugung – ein wasserwirtschaftliches und wassergütewirtschaftliches Problem.
Wasserwirtschaft 56 (1966), H. 8, S. 256
- (4) Krolewski, H. Die künstliche Erwärmung des Flußwassers und deren Auswirkung.
Wasserwirtschaft 57 (1967), H. 8, S. 296
- (5) Caspar, W. Häufigkeitswerte der Lufttemperatur nach Messungen am trockenen und feuchten Thermometer.
Vereinigung Industrielle Kraftwirtschaft (VIK), Essen 1968
- (6) Edinger, J. E.
Duttweiler, D. W.
Geyer, J. C. The response of water temperatures to meteorological conditions.
Water Resources Research 4 (1968), No. 5, S. 1137
- (7) Wemelsfelder, P. J. Wärmeabgabe durch Kraftwerke, ein Problem der Zukunft?
De Ingenieur, Bouw-en Waterbouwkunde 80 (1968), Nr. 51,
S. 179–198
- (8) Morse, W. L. Stream Temperature Prediction Model.
Water Resources Research 6 (1970), No. 1, S. 290
- (9) Morse, W. L. Stream Temperature Prediction under Reduced Flow.
ASCE Annual and National Environmental Engineering Meeting, 18.–22. Oct. 1971, Meeting Preprint 1525
- (10) Fan, L. T.
Hong, S. N. Distributed discharges of cooling water along direction of stream flow.
Water Resources Bulletin 8 (1972), No. 5, S. 1031
- (11) Mult. Probleme des industriellen Kühlwassers, Tagungsbericht.
Technische Mitteilungen 65 (1972), H. 5
- (12) Resch, G.
Burgmann, F. Umweltfragen bei Kühlturbetrieb.
Technische Mitteilungen 65 (1972), H. 5, S. 237
- (13) Kuhn, W. Physikalisch-meteorologische Überlegungen zur Nutzung von Gewässern für Kühlzwecke.
Arch. Met. Geoph. Biokl. Ser. A, 21 (1972), S. 95–122

- (14) Krolewski, H. Technische und wirtschaftliche Probleme zur Frage der Abwärme von thermischen Kraftwerken.
Die Wasserwirtschaft, 63 (1973), S. 363-371
- (15) Novotny, V.
Krenkel, P. A. Simplified mathematical model of temperature changes in rivers.
Journal of Water Pollution Control Federation 45 (1973), No. 2, S. 240
- (16) Günneberg, F. Abwärme in Gewässern.
Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen 17 (1973), H. 1, S. 14
- (17) Yotsukura, N.
Jackman, A. P.
Faust, C. R. Approximation of heat exchange at the air-water interface
Water Resources Research 9 (1973), No. 1, S. 118
- (18) Wolf, P. Simulation des Sauerstoffhaushaltes in Fließgewässern.
Kommissionsverlag R. Oldenburg, München 1974
- (19) Täubert, U. Wasserwirtschaftliche Systemanalyse des Wärmehaushalts von Flüssen.
Darmstädter Wasserbau-Mitteilungen Nr. 12 (1974), S. 88
- (20) Andres, O.
Ortner, G.
Schiffers, A. Zusatzwasser für nasse Kühltürme (1970-1985).
Energie 26 (1974), H. 7/8, S. 235-243
- (21) Täubert, U. Analyse der natürlichen Temperaturen von Flüssen.
gwf - wasser/abwasser 116 (1975), H. 10, S. 441
- (22) Ortner, G.
Höhmann, P.
Schiffers, A. Integrierte Kühlturmzuzusatzwasseraufbereitung und Abwasserbehandlung im RWE-Gaskraftwerk Huckingen.
VGB-Kraftwerkstechnik 55 (1975), H. 1, S. 21-25
- (23) Täubert, U. Der Wärmehaushalt von Flüssen als stochastisches System.
Wasserwirtschaft 65 (1975), H. 12, S. 329-335
- (24) Ortner, G.
Ritter, K. Die Verdunstungsverluste als begrenzender Faktor für Standorte thermischer Kraftwerke an mittleren Flüssen.
Energie 28 (1976), H. 8, S. 224-230
- (25) Klotter, H. E.
Eck, K. Untersuchungen über Temperatur- und Schichtungsverhältnisse in Kies- und Sandgruben (Baggerseen)
Wasserwirtschaft (1964), S. 170-173
- (26) Edinger, J. E.
Brady and Geyer Heat Exchange and Transport in the Environment.
Electric Power Research Institute Research Project RP 49, Report No. 14

- (27) Günneberg, F. Abkühlungsvorgänge in Gewässern.
DGM. 20. Jg. H. 6, Dez. 1976, Seite 151-161
- (28) Arbeitsgemeinschaft der Länder zur Reinhaltung des Rheins
Studie über die Reglementierung der Einleitung von Abwärme
in ein fließendes Oberflächengewässer
- dargelegt am Beispiel des Rheins - 1977
- ARGE RHEIN -